

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2023.03.014

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:寇佳亮,蒋海风,李华华,周恒. HDC 加固受损钢筋混凝土柱轴压性能试验研究及数值模拟[J]. 西安理工大学学报,2023,39(3):433-441.

KOU Jialiang,JIANG Haifeng,LI Huahua,ZHOU Heng. Experimental study and finite element analysis of compressive behavior of damaged reinforced concrete columns strengthened with high ductile concrete[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2023, 39(3): 433-441.

HDC 加固受损钢筋混凝土柱轴压性能 试验研究及数值模拟

寇佳亮^{1,2}, 蒋海风¹, 李华华¹, 周 恒³

(1. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 3. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要: 为研究高延性混凝土(HDC)对受损钢筋混凝土(RC)柱的加固效果,试验设计制作了4根RC方柱,其中3根为预损柱,分别采用不同厚度HDC进行加固,1根未加固试件作为对照组。通过对不同厚度HDC加固的受损RC柱进行轴心受压试验,研究其裂缝发展和破坏规律。在此基础上,建立HDC加固受损RC柱受压试件的ABAQUS有限元模型,利用ABAQUS对不同厚度HDC加固受损RC柱的试验进行数值模拟,并分析其受力机理。最后,通过对试验和模拟数据的分析,考虑HDC材料强度利用系数对受损RC柱承载力的影响,提出了HDC加固受损RC柱的极限承载力计算方法,并通过试验验证了模拟结果与计算结果的可行性,可为采用该加固方式的实际工程提供有力参考。

关键词: 高延性混凝土; 加固受损钢筋混凝土柱; 受压性能; 有限元分析; 承载能力

中图分类号: TU375.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2023)03-0433-09

Experimental study and finite element analysis of compressive behavior of damaged reinforced concrete columns strengthened with high ductile concrete

KOU Jialiang^{1,2}, JIANG Haifeng¹, LI Huahua¹, ZHOU Heng³

(1. Faculty of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology,

Xi'an 710048, China; 3. Northwest Engineering Corporation Limited, Power China, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to study the reinforcement effect of high ductility concrete (HDC) on damaged reinforced concrete (RC) columns, four RC square columns were designed and manufactured in the experiment. Among them, three were pre damaged columns and were reinforced with different thicknesses of HDC. One unreinforced specimen was used as the control group. By conducting axial compression tests on damaged RC columns reinforced with HDC with different thicknesses, the development and failure patterns of cracks were studied. On this basis, an ABAQUS finite element model of HDC reinforced damaged RC column compression specimens was established. ABAQUS was used to numerically simulate the tests on HDC reinforced damaged RC columns with different thicknesses, with its stress mechanism analyzed. Finally, by analyzing experimental and simulated data, considering the influence of HDC material strength utilization coefficient on the bearing capacity of damaged RC columns, a calculation method for the ultimate bearing capacity of HDC reinforced damaged RC columns is proposed. The feasibility of the simulation results and calculation results is verified through experiments, which can provide a strong

收稿日期: 2022-07-15; 网络首发日期: 2023-04-11

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20230411.1250.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52079109,51408487);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2020JM-454)

通信作者: 寇佳亮,男,博士,副教授,研究方向为高性能纤维混凝土力学性能。E-mail: jialiengkou0918@163.com

reference for practical engineering using this reinforcement method.

Key words: high ductile concrete; strengthening damaged reinforced concrete columns; compressive performance; finite element analysis; carrying capacity

钢筋混凝土(RC)柱是建筑工程结构中最基础的承重试件,但由于使用载荷增加、设计存在缺陷以及各种自然因素的干扰,造成 RC 柱受损,使其刚度和承载力降低,严重威胁建筑的使用安全,需要对其进行加固处理^[1]。常用的加固措施有增大截面加固法、外包钢加固法、粘贴碳纤维布加固法等。增大截面加固法具有工艺简单、受力可靠等优点,但其减少了房屋净空,不能有效改善混凝土受压构件的脆性破坏形式。外包钢加固法大幅度提高了受压构件的正截面承载力和截面刚度^[2-3],但其用钢量较大且容易锈蚀。粘贴碳纤维布加固法施工方便,不增加结构自重,沿纤维布基体方向的抗拉强度比钢材还高,能显著增强受压构件的承载力和延性^[4-5],其加固的效果主要取决于纤维的粘贴工艺。

高延性混凝土(high ductile concrete, HDC)由于纤维的增强作用^[5],使得混凝土具有更强的变形能力和良好的阻裂能力。采用 HDC 加固 RC 柱^[6-7],不仅可以显著提高试件承载力和延性^[8-9],而且对柱的原有结构破坏较少,加固后可以有效解决柱的开裂现象,从而预防 RC 柱中钢筋的锈蚀。在配制 HDC 的过程中,用粉煤灰等工业废料代替部分水泥,可获得良好的经济效益和环境效益。

Khan 等^[10]通过建立 ABAQUS 有限元模型,基于有效材料应力的计算准则,研究了材料强度扩展范围、几何尺寸和缩尺对 ECC-CES 柱轴心受压性能的影响;Emara 等^[11]通过钢丝网(SWM)附加内约束,以聚丙烯纤维的体积分数(1%、1.5%和2%)、SWM 排列方式和 SWM 层数为主要参数,研究了工程水泥基复合材料(ECC)圆柱在轴压荷载下的力学性能。邓明科等^[12]通过对 HDC 试块进行二次抗压试验,得出试块受损后其抗压强度相比第一次试验损失较小,表明 HDC 具有良好的耐损伤性能。文献^[13]通过 HDC 加固震损 RC 柱的轴心受压试验,研究了震损柱在大的截面尺寸和高度下 HDC 加固对混凝土短柱加固效果的影响,提出了受损短柱轴心受压承载力公式。

综上,为研究 HDC 对受损 RC 柱的加固效果,试验设计制作了三根预损 RC 柱,通过改变 HDC 加固层厚度,对预损柱进行加固修复,通过不同厚度 HDC 加固受损 RC 柱的轴心受压试验,总结出其裂缝发展和破坏规律,根据试验现象及试验数据研究箍筋、纵筋和 HDC 加固层的联合作用机理。在此

基础上,建立了 HDC 加固受损 RC 柱受压试件的 ABAQUS 三维有限元模型,通过 ABAQUS 对不同厚度 HDC 加固受损 RC 柱的试验进行数值模拟,并分析其受力机理。最后,通过对试验和模拟数据的分析,考虑了 HDC 材料强度利用系数、HDC 加固层厚度以及新旧混凝土组合截面强度对受损 RC 柱承载力的影响,提出了 HDC 加固受损 RC 柱的承载力计算方法。

1 试验概况

1.1 试件设计和加固方法

试验设计制作了 4 根 RC 方柱,其中 3 根为预损柱(通过轴压加载至试验 RC 柱峰值荷载的 100%),分别采用厚度为 10 mm、15 mm、20 mm 的 HDC 进行加固,1 根未加固试件作为对照组。原柱边长为 200 mm,长度为 1 000 mm,混凝土设计强度等级为 C25,配合比为水泥:砂子:石:水=1:2.40:3.60:0.65,纵筋型号为 HRB335,箍筋型号为 HPB300,钢筋保护层为 25 mm。为了使 HDC 加固层能够有效传递轴力,且减少人工凿毛对受损柱造成二次损伤,对损坏严重的部位要求无松渣,而对未损坏区域进行了凿毛,平均凿毛深度为 10 mm,以增大结合面的粗糙度,所有损伤试件均采用模板进行浇筑加固,浇筑完成后在标准条件下进行统一养护。加固后试件的尺寸、纵筋和箍筋数量见图 1。钢筋的力学性能参数见表 1,加固设计方案见表 2。

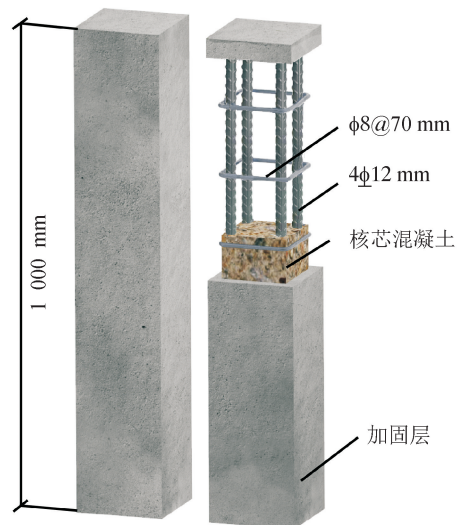


图 1 试件设计示意图

Fig. 1 Schematic diagram of specimen design

表1 钢筋力学性能参数表

Tab. 1 Parameter table of mechanical properties of steel bars

| 钢筋型号 | 直径 d / mm | 弹性模量 E /MPa | 屈服强度 f_y /MPa |
|--------|----------------|-------------------|--------------------|
| HPB300 | 8 | 2.1×10^5 | 316 |
| HRB335 | 12 | 2.0×10^5 | 361.6 |

表2 加固试件设计方案

Tab. 2 Reinforced specimen design plan

| 试件编号 | 加固厚度/mm | 截面面积/mm ² | 损伤程度/% |
|------|---------|----------------------|--------|
| RC-1 | 0 | 200×200 | 0 |
| RC-2 | 10 | 220×220 | 100 |
| RC-3 | 15 | 230×230 | 100 |
| RC-4 | 20 | 240×240 | 100 |

1.2 材料力学性能

试验纤维选用聚乙烯醇纤维(PVA),体积掺量为2%,主要性能指标见表3。基于文献[13]对配合比的研究,本试验HDC配合比见表4。

表3 纤维性能指标

Tab. 3 Fiber performance index

| 纤维名称 | 长度/mm | 直径/ μ m | 抗拉强度/MPa | 伸长率/% | 弹性模量/GPa |
|------|-------|-------------|----------|-------|----------|
| PVA | 12.0 | 40.0 | 1 630.0 | 6.9 | 43.0 |

表4 HDC 配合比

Tab. 4 HDC mix ratio

| 水泥 | 粉煤灰 | 砂子 | 水 | 减水剂 |
|----|-----|------|------|------|
| 1 | 1 | 0.72 | 0.58 | 0.03 |

试验前按照相关标准^[14]测试了混凝土试块和HDC的平均抗压强度值($f_{cu,m}$)和平均抗拉强度值($f_{t,m}$),其力学性能指标见表5。

表5 HDC和混凝土的力学性能指标

Tab. 5 Mechanical properties of HDC and concrete

| 材料 | 抗压强度 $f_{cu,m}$ / MPa | 抗拉强度 $f_{t,m}$ / MPa |
|-----|--------------------------|-------------------------|
| 混凝土 | 33.28 | 1.78 |
| HDC | 54.57 | 5.71 |

1.3 试验装置及加载制度

试验加载装置为YAW-5000F液压伺服试验机,如图2所示。试验前,先清理试件灰尘,将试件刷白,以便试验过程中对裂缝进行观察。轻微打磨试件上下表面,对试件进行调平对中,在柱顶部铺砂,以确保柱顶面均布受压。正式加载时,先采用力控制的加载方式,每级加载50kN,设置荷载持荷,

以模拟试件承受静力荷载时的受力状态。当荷载达到最大荷载的75%时,将加载方式转换为位移控制,加载速率为0.1mm/s。当荷载降到最大荷载的60%左右时,停止试验。

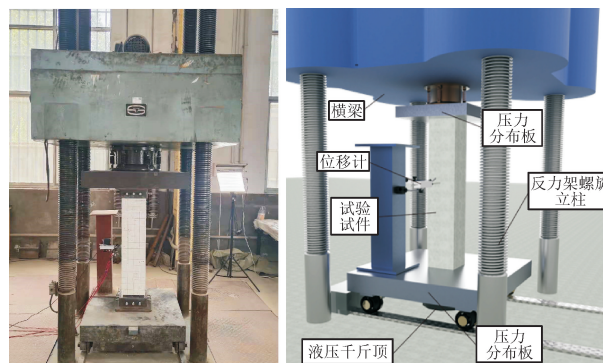


图2 试验加载装置及其示意图

Fig. 2 Test loading device and its schematic diagram

2 试验现象与结果分析

2.1 试验现象

对于未加固试件RC-1,在荷载加载至534kN左右时,柱顶部首先出现细微裂缝;当荷载达到800kN,裂缝发展迅速并且不断变宽,同时不断伴有清脆的断裂声;当加载至极限荷载时,柱中部裂缝贯通,柱中部混凝土出现大块剥落,荷载开始快速下降,随后试件破坏,RC-1破坏形态如图3(a)所示。

对于加固试件RC-2,在荷载加载至580kN左右时,柱右上角和左下角均有裂缝产生;随着荷载的增加,裂缝不断变宽,上下两条裂缝逐渐向柱中部延伸;当荷载加载至1200kN左右,上下两条裂缝在柱中部相交,此时柱右上角产生的初始裂缝宽度已达到1.5cm;当达到峰值荷载时,RC-2柱中部出现了多条交错裂缝,并且不断伴有纤维撕裂的声音,此时初始裂缝宽度达到2.4cm,柱中部有明显鼓凸现象,最终试件由于角部裂开而发生破坏,在这一过程中,没有发生混凝土剥落的现象,RC-2破坏形态如图3(b)所示。

加固试件RC-3开裂荷载为600kN左右,初始裂缝出现在柱中上部距离柱顶端12cm处;随着荷载的增加,裂缝向下缓慢延伸,柱中部出现轻微鼓凸现象;当加载至1300kN时,柱南面裂缝与东面裂缝贯通,纤维摩擦声不断加大;峰值荷载过后,荷载下降缓慢,竖向位移不断增大,RC-3破坏形态如图3(c)所示。加固试件RC-4的试验现象与RC-3基本类似(图3(d))。

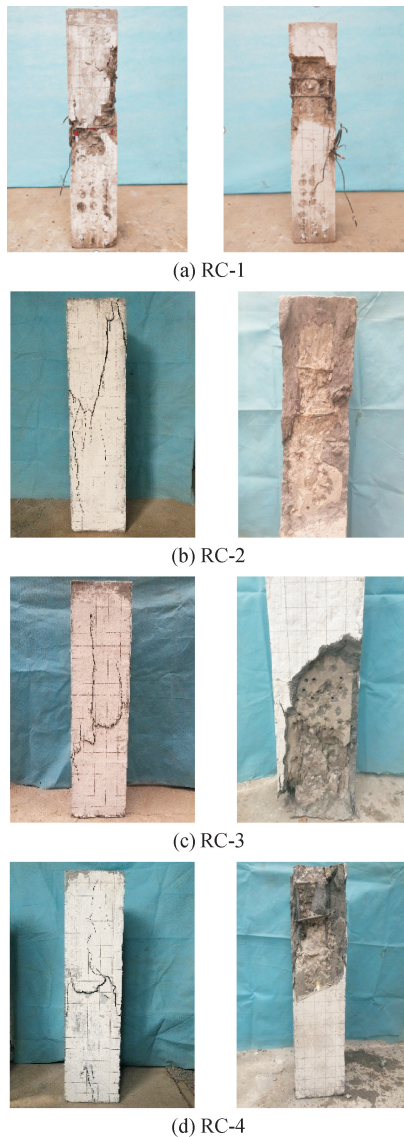


图 3 试件破坏形态图

Fig. 3 Failure pattern diagram of specimen

2.2 破坏形态分析

未加固柱 RC-1 破坏时,裂缝围绕试件四周分布,裂缝贯穿于柱身,混凝土呈大块脱落,箍筋外露,纵筋向外凸出,发生压屈,使得试件丧失承载力。各加固试件在加载过程中,首先产生和发展的是竖向裂缝,表明在试件屈服前,加固层主要发挥的是竖向抗压能力。当发生屈服后,试件中部有明显鼓凸现象,说明加固层对核心混凝土的横向变形有约束作用。当试件破坏后,试件总体形态保持较好,除 RC-2 因角部开裂破坏外,其余加固柱均呈现中部鼓凸破坏,将外包 HDC 加固层凿开后,发现部分混凝土被压碎,其余 HDC 加固层与原混凝土粘结状态良好,体现了 HDC 较好的变形能力和阻裂能力。

2.3 试验结果分析

由图 4 可知,相较于 RC-1, RC-2、RC-3、RC-4

荷载上升较快,荷载-位移曲线下降段更长,随着加固层厚度的增加,受损 RC 柱的极限承载力和变形能力不断增加,最大荷载提高幅值约为 17%~40%,极限位移提高幅值约为 3%~18%。

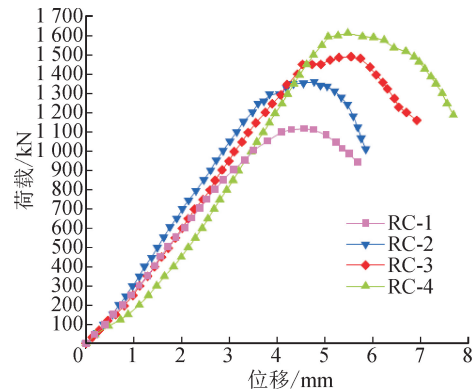


图 4 试件荷载-位移曲线对比图

Fig. 4 Load-displacement curve of specimen

3 HDC 加固受损 RC 柱轴心受压有限元模拟

3.1 HDC 加固受损 RC 柱有限元模型

采用 ABAQUS 按照试验柱尺寸建立 HDC 加固 RC 柱的有限元模型, HDC 加固层和混凝土单元选用 C3D8R, 钢筋单元选取 T3D2, 钢筋骨架采用嵌入的方式装配到混凝土中, 边界条件为底部位移/转角完全固定, 轴向荷载施加在顶部的耦合点。利用 ABAQUS 软件求解模块中的“生死单元”来控制 HDC 加固层是否参与计算, 首先使加固层单元失效, 对原混凝土柱施加与试验相应的荷载, 以此获得损伤 RC 柱模型, 然后再将加固层部分单元激活, 模拟加固后柱的受荷工况, 加载制度与试验保持一致, 有限元模型如图 5 所示。

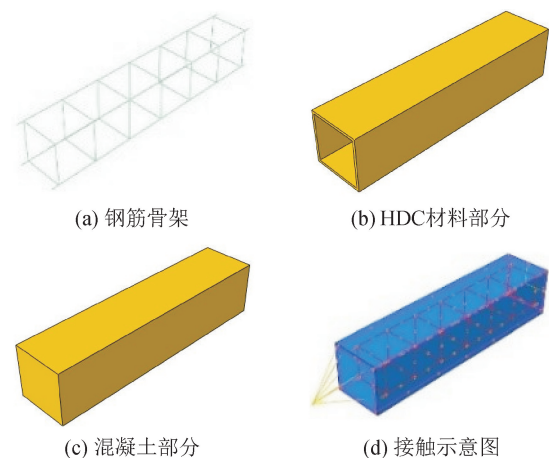


图 5 HDC 加固受损 RC 柱有限元模型

Fig. 5 Finite element model for damaged RC column reinforced by HDC

3.2 材料本构模型

混凝土、钢筋的本构模型选自《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[15]。HDC 本构关系采用刘伟康^[16] ECC 本构关系,文献中受压本构关系如图 6 所示, x 为应变与峰值应变的比值, y 为应力与峰值应力的比值。

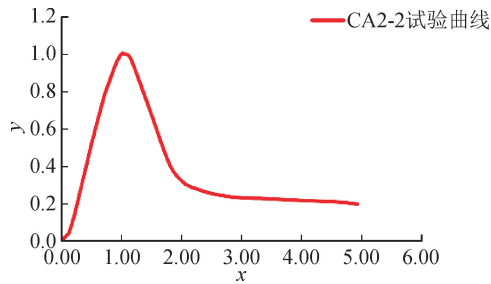


图 6 HDC 受压本构曲线^[16]

Fig. 6 Constitutive curve of HDC under compression^[16]

对于 HDC 混凝土上升段,拟合公式为:

$$y = b + ax + cx^5 + dx^6 \quad (1)$$

其中, $b=0, c=6-5a, d=4a-5$,则:

$$y = ax + (6-5a)x^5 + (4a-5)x^6 \quad (2)$$

下降段拟合后,拟合公式为:

$$y = \frac{(b-1)x^2}{1-2x+bx^2} \quad (3)$$

通过对文献^[16]中试验数据的分析,得到上升段及下降段拟合公式中的待定系数, $a=1.10, b=1.15$ 。

由图 7 可知,在试件开裂之前,曲线线性增加,当开始产生裂缝时,由于混凝土组成成分的多相性,混凝土内部应力分布不均匀,导致曲线出现上下波动,为简化计算,将上下波动的曲线拟合成一条直线。

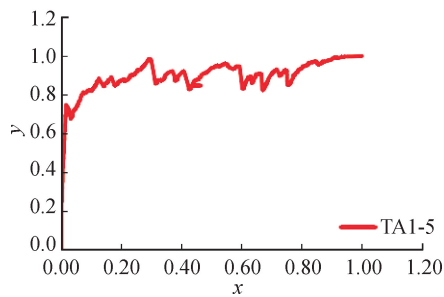


图 7 ECC 受拉本构曲线^[16]

Fig. 7 ECC tensile constitutive curve^[16]

4 HDC 加固受损 RC 柱有限元模拟结果分析

4.1 有限元模拟结果分析

由表 6 可知,模拟试件 RC-1(未加固)的最大荷载为 1 208 kN,模拟试件 RC-2(加固厚度 10 mm)的最大荷载为 1 419 kN,模拟试件 RC-3(加固厚度

15 mm)的最大荷载为 1 525 kN,模拟试件 RC-4(加固厚度 20 mm)的最大荷载为 1 653 kN,加固柱模拟计算得到的峰值荷载与试验值之比的平均值为 1.034,试验误差均保持在 5%以内,两者吻合较好,说明该有限元模型能够较好地模拟试验过程。

表 6 有限元模拟结果

Tab. 6 Finite element simulation results

| 试件编号 | 模拟值/ kN | 试验值/ kN | 模拟值与 试验值之比 | 竖向位移/ mm | 极限位移/ mm |
|------|------------|------------|---------------|-------------|-------------|
| RC-1 | 1 208 | 1 153 | 1.048 | 5.60 | 8.46 |
| RC-2 | 1 419 | 1 356 | 1.046 | 6.51 | 10.09 |
| RC-3 | 1 525 | 1 483 | 1.028 | 6.83 | 10.54 |
| RC-4 | 1 653 | 1 611 | 1.026 | 7.15 | 10.73 |

由图 8 可知,模拟试件的荷载-位移曲线在上升段与试验试件基本保持一致。各试件达到屈服时,加固试件的荷载-位移曲线相对饱满,而未加固试件在这一过程中表现较差。在达到峰值荷载之后,试件 RC-1 的荷载-位移曲线下落较快,而加固试件下降相对较慢,并且趋于平缓,与试验现象保持一致。模拟柱的最大应力及其应变均大于试验柱,但两者的荷载-位移曲线特征总体吻合。

4.2 有限元试件破坏形态分析

由图 9 可知,在轴向压力下,各试件均出现鼓凸现象。未加固试件 RC-1 破坏时,变形主要集中在试件中部,试件边缘褶皱明显,与 RC 柱的轴压破坏试验现象基本一致。对于加固试件,在轴向压力下,随着 HDC 加固层厚度的增加,试件中部褶皱减少,试件边缘变得平滑,鼓凸趋势由中部向两边延伸,说明随着加固层厚度的增加,HDC 加固层在约束内部混凝土的同时,分担了更多轴向压力。

4.3 有限元试件各部件塑性云图

从图 10 分析可得,各试件塑性变形较大的位置均出现在试件中部,而试件两端的塑性变形均较小,说明加固层为核心混凝土提供的约束力并不均匀。试件 RC-1 塑性变形较为严重的区域集中,破坏范围较小。加固试件的塑性应变区域与 RC-1 相比,塑性变形严重的区域扩大,且随着 HDC 加固层厚度的增加,塑性变形范围向试件两端扩展,说明 HDC 加固层能在较大区域为内部核心混凝土提供面向约束。

由图 11 可以看出,试件破坏时,混凝土中心区域的塑性应变较大,而角部区域塑性变形较弱,表明加固层为核心混凝土提供的约束力并不均匀。随着加固层厚度的增加,中心区域塑性变形不断增大,说

明 HDC 加固层厚度能够较大程度激发原混凝土的抗压潜能。

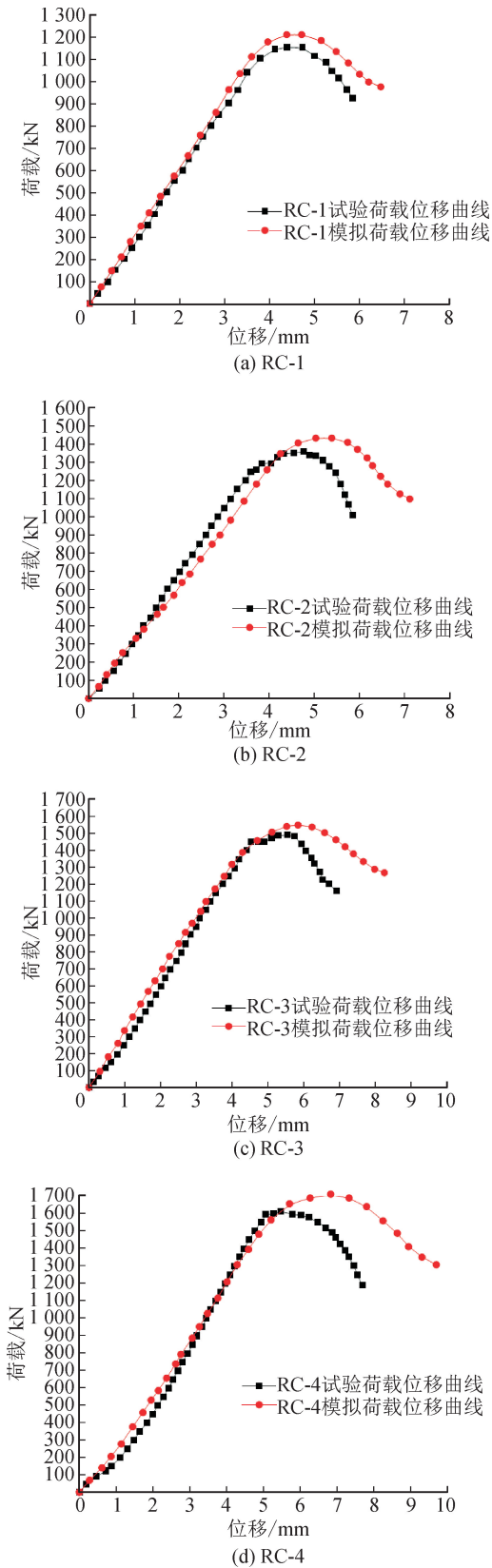


图 8 荷载-位移曲线对比分析

Fig. 8 Comparative analysis of load-displacement curves

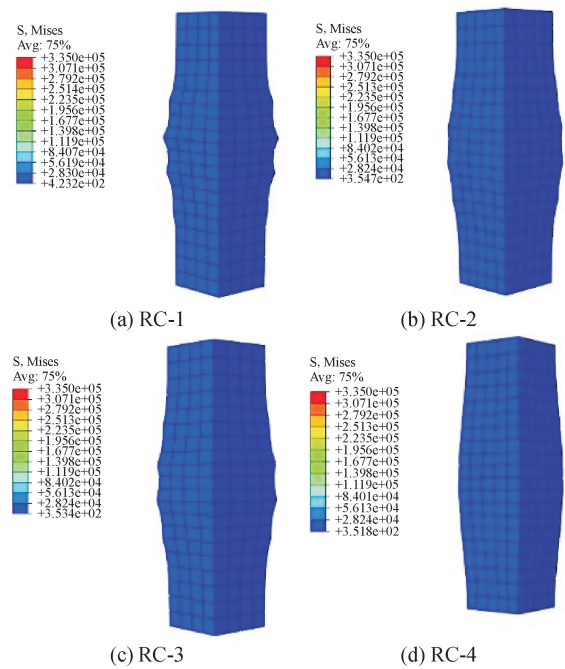


图 9 模拟加固试件破坏形态图

Fig. 9 Destroy shape diagram of simulated reinforcement specimen

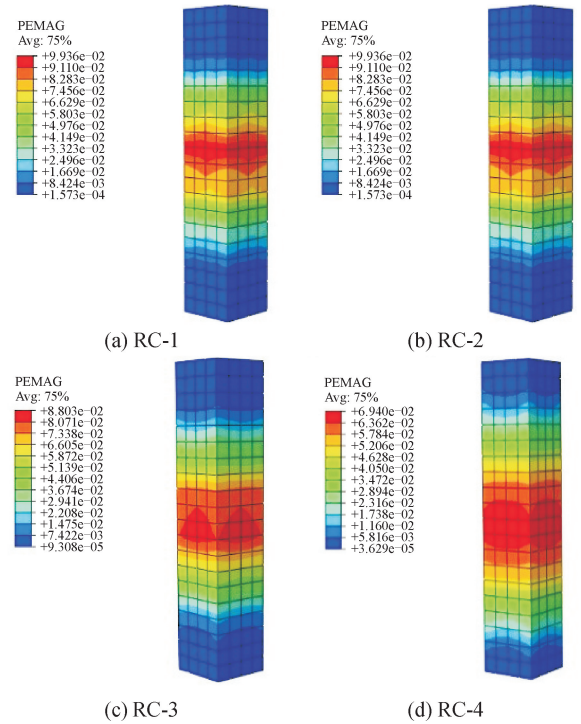


图 10 模拟加固试件塑性图

Fig. 10 Plastic diagram of simulated reinforcement specimen

由图 12 分析可得,随着加固层厚度的增加,试件在破坏时,试件内部钢筋的屈服区域也在不断增加,说明 HDC 加固层为内部核心混凝土提供了有效的面向约束,使得核心混凝土中有效抗压区域增多,从而使得钢筋屈服区域增加,最终保证试件承载力的稳定上升。

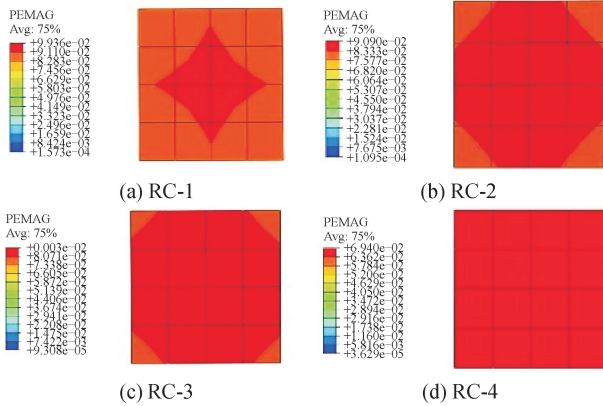


图 11 模拟加固试件塑性切面图

Fig. 11 Plastic section of simulated reinforcement specimen

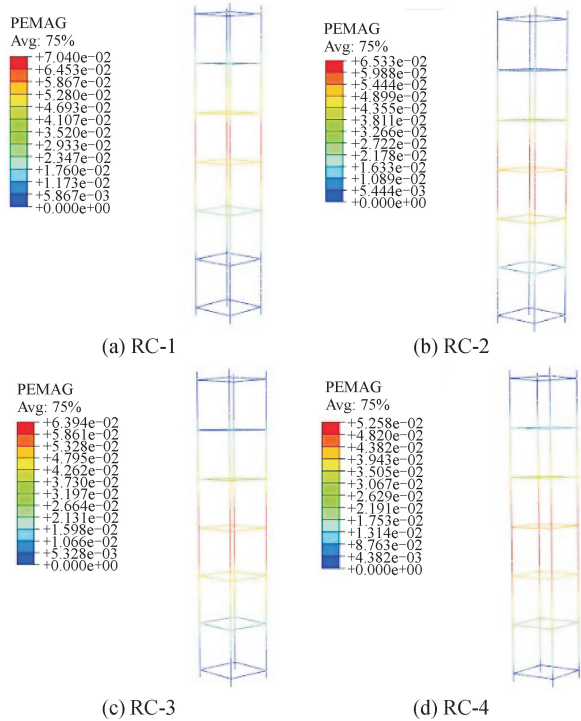


图 12 模拟加固试件钢筋塑性图

Fig. 12 Reinforced plasticity diagram of simulated reinforcement specimen

5 HDC 加固受损 RC 柱轴心受压承载力计算

5.1 HDC 加固轴心受压受损 RC 柱机理分析

由图 13 可以看出,当未加固试件达到峰值应变时,应力开始下降,而 HDC 加固试件的应力与应变均保持上升。当原混凝土达到极限承载力时,HDC 加固层开始发挥面向约束性能,使得加固试件应力继续上升。由 2.1 节试验可知,加固试件的峰值荷载和位移均大于未加固试件,这是由于 HDC 加固层提供了较大的承载力,且随着 HDC 加固层厚度

的增大,加固试件极限位移和承载力的提高幅值也在增大。考虑到采用 HDC 加固能提供较大的竖向抗压能力(与普通混凝土加固相比),并且能在一定程度上约束核心混凝土的横向变形,使得核心混凝土部分处于三向受压状态,故将 HDC 加固受损 RC 方柱的轴心受压承载力分为两部分:第一部分为 HDC 加固层提供的承载力;第二部分为三向受压下核心混凝土提供的承载力。

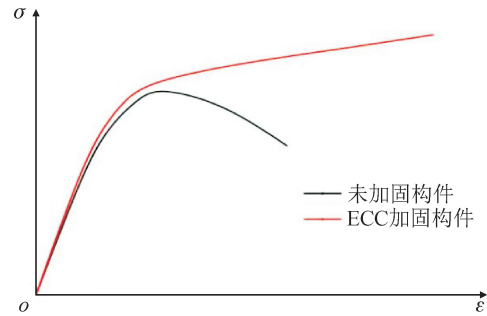


图 13 约束应力-应变曲线

Fig. 13 Confined stress-strain curve

5.2 正截面承载力计算基本假定

根据叠加原理,在推导 HDC 加固受损 RC 柱的轴心受压承载力公式时,作如下假设。

1) 预损 RC 柱四周外包的 HDC 厚度相同,且交界面不发生黏结滑移,两者能够协同变形且共同承担荷载。

2) HDC 加固受损柱截面符合平截面假定。

3) 混凝土本构模型采用 Hognestad 等^[17]建议的本构模型:

$$\sigma = f_{c,m} \left[2 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right) - \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2 \right], \quad \epsilon \leq \epsilon_0 \quad (4)$$

式中: $f_{c,m}$ 为混凝土轴心抗压强度平均值; ϵ_0 为混凝土峰值应变。

5.3 HDC 加固层承载力分析

由于 HDC 材料的峰值压应变均大于混凝土峰值压应变,当两者协调变形共同承担荷载时,会导致加固层材料强度未充分利用^[18],且由 4.3 节可知,随着受损柱加固层厚度的增大,试件整体的变形能力也在增强,故考虑加固材料的利用对受损柱承载力的影响。定义材料利用系数 η 为:加固试件达到峰值荷载时,HDC 材料压应力 σ_i 与峰值压应力 σ_h 的比值。由于 HDC 加固层与原混凝土变形协调,故当原混凝土应力达到极限应力 σ_u 时,有 $\sigma_i = \sigma_u$ 。由此得到 HDC 加固层利用系数 η 的计算公式为:

$$\eta = \frac{\sigma_i}{\sigma_h} \quad (5)$$

故第一部分 HDC 加固层提供的承载力可以表

示为:

$$N_1 = \eta f_{c1} A_1 \quad (6)$$

式中: f_{c1} 为 HDC 圆柱体抗压强度; A_1 为 HDC 截面面积。

5.4 核心混凝土承载力分析

文献[19]从方形钢管混凝土的角度,分析了方形 HDC 混凝土侧向约束减弱的影响,将 HDC 加固破损 RC 方柱等效成圆截面,借鉴其结果,得到核心混凝土承载力公式为:

$$N_2 = (f_{c2} + \gamma_u k \frac{2k_e f_f}{a/t - 2}) A_2 \quad (7)$$

式中: f_{c2} 为混凝土抗压强度; γ_u 为核心混凝土折减系数,参考文献[20], $\gamma_u = 1.67D_c^{-0.112}$, 其中 D_c 为 HDC 加固受损 RC 方柱等效圆形截面直径; k 为侧向约束系数,根据文献[21],取 $k=2.26$; k_e 为有效约束系数,参考文献[19], $k_e = 1/3$; f_f 为 HDC 抗拉强度; a 为 HDC 加固受损柱截面边长; t 为 HDC 加固层厚度; A_2 为原混凝土截面面积。

5.5 HDC 加固受损 RC 柱正截面承载力计算

根据理论分析及公式推导,得出 HDC 加固受损 RC 柱正截面承载力计算公式:

$$N = \eta f_{c1} A_1 + (f_{c2} + \gamma_u k \frac{2k_e f_f}{a/t - 2}) A_2 \quad (8)$$

由表 7 可得,计算结果符合加固柱的承载力随加固厚度的增加而提高的试验规律;计算结果与模拟结果均大于试验结果,究其原因可能是原柱损伤过大;HDC 加固柱极限承载力的计算值与试验值的最大误差为 2.02%,与模拟值的最大误差为 -2.9%,所有误差均保持在 5%以内,验证了计算公式的可行性。

表 7 计算结果对比

Tab. 7 Comparison of calculation results

| 试件 编号 | 试验值/ kN | 计算值/ kN | 模拟值/ kN | $n_1/\%$ | $n_2/\%$ |
|----------|------------|------------|------------|----------|----------|
| RC-2 | 1 356 | 1 377.5 | 1 419 | 1.59 | -2.9 |
| RC-3 | 1 483 | 1 506.5 | 1 525 | 1.58 | -1.2 |
| RC-4 | 1 611 | 1 643.5 | 1 653 | 2.02 | -0.6 |

注: n_1 为计算值与试验值的误差; n_2 为计算值与模拟值的误差。

6 结论

1) HDC 对原受损 RC 柱的修复效果良好, HDC 加固层延缓了裂缝发展速度,改善了试件破坏方式,极大地提高了受损 RC 柱的整体性,保证了轴

向压力的有效传递。

2) 相较于未加固试件, HDC 加固试件在达到峰值荷载之后,荷载-位移曲线下降段更长且曲线更平缓,表明 HDC 加固后的受损 RC 柱变形能力增强,承载力提高。

3) HDC 加固层的厚度能够影响混凝土中心区域的抗压能力。随着 HDC 加固层厚度的增加, HDC 能在较大区域为内部核心混凝土提供面向约束,且能够较大程度激发原混凝土部分的抗压潜能。

4) 利用 ABAQUS 有限元软件,建立 HDC 加固受损 RC 柱的有限元模型,模拟荷载-位移曲线和试验荷载-位移曲线吻合较好,表明有限元模型能较好地模拟 HDC 加固受损 RC 柱的受力过程。

5) 通过分析 HDC 对受损 RC 柱的作用机理,提出了 HDC 加固受损试件的承载力计算公式,计算结果与试验结果的误差均较小。

参考文献:

- [1] 徐镇凯,袁志军,胡济群. 建筑结构检测与加固方法[J]. 工程力学,2006,23(S2):117-130.
XU Zhenkai, YUAN Zhijun, HU Jiqun. The inspection and strengthening methods on building structures[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(S2): 117-130.
- [2] 张正涛,任庆新,任德斌,等. 外包钢加固火灾后钢管混凝土叠合短柱轴压性能研究[J]. 工业建筑,2020,50(10):187-193.
ZHANG Zhengtao, REN Qingxin, REN Debin, et al. Study on axial compression performances of concrete-encased concrete-filled steel-tube stub columns strengthened with external steel frames after exposure to fire[J]. Industrial Construction, 2020, 50(10):187-193.
- [3] 徐铨彪,干钢,陈刚. 外包钢加固钢筋混凝土框架梁受力性能分析[J]. 建筑结构学报,2016,37(12):136-143.
XU Quanbiao, GAN Gang, CHEN Gang. Analysis on mechanical behavior of RC frame beams encased with steel plate[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(12):136-143.
- [4] 洗巧玲,易伟建,丁洪涛. 粘贴碳纤维布(CFRP)钢筋混凝土偏压柱试验研究[J]. 工业建筑,2004,34(11):78-81.
XIAN Qiaoling, YI Weijian, DING Hongtao. Experiment and research of reinforced concrete column externally bonded with CFRP sheets under eccentric load[J]. Industrial Construction, 2004, 34(11):78-81.
- [5] 蒋海燕,宋晓滨,顾祥林,等. 碳纤维布增强钢-木屈曲约束支撑低周反复加载试验研究[J]. 建筑结构学报,2021,42(8):136-143.
JIANG Haiyan, SONG Xiaobin, GU Xianglin, et al.

- Low cyclic loading tests on steel-timber buckling-restrained braces strengthened with CFRP sheets[J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(8):136-143.
- [6] 梁兴文,徐洁,邢朋涛,等. 纤维增强混凝土柱抗震性能试验研究及数值模拟[J]. *工程力学*, 2016, 33(8): 66-76,92.
LIANG Xingwen, XU Jie, XING Pengtao, et al. Experimental study and numerical simulation on the seismic behavior of fiber reinforced concrete columns [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(8): 66-76, 92.
- [7] 邓明科,张阳玺,胡红波. 高延性混凝土加固钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2017, 38(6):86-94.
DENG Mingke, ZHANG Yangxi, HU Hongbo. Experimental study on seismic behavior of reinforced concrete column strengthened with high ductile concrete [J]. *Journal of Building Structures*, 2017, 38(6): 86-94.
- [8] LI V C. On engineered cementitious composites (ECC) a review of the material and its applications[J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2003, 1(3): 215-230.
- [9] FISCHER G, LI V C. Effect of matrix ductility on deformation behavior of steel reinforced ECC flexural members under reversed cyclic loading conditions[J]. *ACI Structural Journal*, 2002, 99(6): 781-790.
- [10] KHAN M K I, LEE C K, ZHANG Y X. Parametric study on high strength ECC-CES composite columns under axial compression[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 44(8):102883.
- [11] EMARA M, MOHAMED H A, RIZK M S, et al. Behavior of ECC columns confined using steel wire mesh under axial loading[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 43(1):102809.
- [12] 邓明科,秦萌,梁兴文. 高延性纤维混凝土抗压性能试验研究[J]. *工业建筑*, 2015, 45(4):120-126.
DENG Mingke, QIN Meng, LIANG Xingwen. Experimental study of compressive behavior of engineered cementitious composites [J]. *Industrial Construction*, 2015, 45(4): 120-126.
- [13] 寇佳亮,李豹,徐炎,等. 高延性混凝土加固震损混凝土短柱轴压性能试验及承载能力研究[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(16):234-244,252.
KOU Jialiang, LI Bao, XU Yan, et al. An experimental study on axial compression performance and load capacity analysis of HDC reinforced short columns of damaged concrete[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(16): 234-244, 252.
- [14] 大连理工大学. 纤维混凝土试验方法标准:CECS 13: 2009 [S]. 北京:中国计划出版社,2010.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [16] 刘伟康. ECC 受压和受拉性能及本构模型研究[D]. 郑州:郑州大学,2018.
LIU Weikang. Research on the compressive and tensile properties and constitutive model of ECC [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018.
- [17] HOGNESTAD E, HANSON N W, MCHENRY D. Concrete stress distribution in ultimate strength design [J]. *Journal Proceedings*, 1955, 52(12): 455-480.
- [18] 邓明科,李睿喆,张阳玺. HDC 与 RPC 加固 RC 柱轴心受压性能试验研究[J]. *工程力学*, 2020, 37(9): 74-83.
DENG Mingke, LI Ruizhe, ZHANG Yangxi. Experimental investigation on axial compression behavior of RC columns strengthened with HDC and RPC jackets [J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(9): 74-83.
- [19] 寇佳亮,景国强,张浩博,等. HDC 加固破损混凝土短柱受压性能试验及承载能力研究[J]. *应用力学学报*, 2020, 37(3):1212-1217,1401.
KOU Jialiang, JING Guoqiang, ZHANG Haobo, et al. Experimental study on compressive behavior and bearing capacity of damaged concrete short columns strengthened with high ductile concrete[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2020, 37(3): 1212-1217, 1401.
- [20] SAKINO K, NAKAHARA H, MORINO S, et al. Behavior of centrally loaded concrete-filled steel-tube short columns[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130(2):180-188.
- [21] 于峰,牛荻涛. 基于双剪统一强度理论的 FRP 约束混凝土的承载力[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2009, 41(12):186-189.
YU Feng, NIU Ditao. Bearing capacity of FRP-confined concrete based on twin shear unified strength theory[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2009, 41(12):186-189.

(责任编辑 周 蓓)