

文章编号: 1001-4888(2022)05-0689-12

# CFRP 约束型钢再生混凝土组合柱 轴压性能有限元非线性分析<sup>\*</sup>

马辉<sup>1</sup>, 杨藩婷<sup>2</sup>, 黄成<sup>1</sup>, 阿鑫<sup>3, 4</sup>

(1. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西西安 710048; 2. 河南省城乡规划设计研究总院股份有限公司, 河南郑州 450044; 3. 青海省建筑建材科学研究院有限责任公司, 青海西宁 810008; 4. 青海省高原绿色建筑与生态社区重点实验室, 青海西宁 810008)

**摘要:** 在碳纤维(CFRP)约束型钢再生混凝土组合柱轴压试验的基础上, 采用 ABAQUS 有限元软件对组合柱进行非线性分析, 研究了纤维布层数、再生骨料取代率、再生混凝土强度以及长细比等设计参数对组合柱轴压性能的影响规律; 组合柱的计算结果与试验结果吻合较好, 验证了数值模型建立的合理性, 在此基础上, 还对组合柱进行了有限元参数拓展分析。结果表明: 再生混凝土首先开裂且发生塑性变形, 随后型钢、纵筋相继屈服, 最后 CFRP 达到极限抗拉强度, 试件发生破坏; 再生粗骨料取代率的增大对构件受力性能产生不利影响; 随着再生混凝土强度的提高, 构件的承载力增幅较大, 但延性变差; 纤维布层数对组合柱承载力和变形能力影响显著, 承载力最大增幅为 55.2%; 长细比增大对组合柱的轴压性能产生不利影响。基于上述研究, 本文采用叠加原理提出了 CFRP 约束型钢再生混凝土组合柱的轴压承载力计算公式。

**关键词:** 碳纤维; 组合柱; 轴压性能; 型钢再生混凝土; 有限元分析

**中图分类号:** TU398

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.7520/1001-4888-21-303

## 0 引言

再生混凝土是指废弃混凝土块经过特定的生产工艺加工后, 获取的不同级配的再生骨料。废弃混凝土回收利用可有效缓解资源短缺与环境恶化之间的矛盾, 符合我国可持续发展要求。然而, 再生骨料的内部缺陷导致再生混凝土的力学性能不及天然混凝土<sup>[1]</sup>, 因此亟需提高再生混凝土及其结构的力学性能, 以扩展其工程应用范围。

型钢混凝土组合结构发展逐步成熟, 将再生混凝土应用于组合结构中可有效改善其受力性能, 并能践行绿色发展理念<sup>[3]</sup>。另外, 研究表明<sup>[4, 5]</sup>, 纤维布的约束作用能够限制混凝土裂缝的发展, 降低再生骨料对混凝土力学性能的不利影响; 对组合柱而言, 纤维布的约束作用可缓解内置型钢局部屈曲的不足<sup>[2-5]</sup>。基于此, 本文提出了 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Polymer)约束型钢再生混凝土组合柱, 该组合形式可以提高核心区再生混凝土的抗压强度, 并且能够高效地利用型钢的良好特性改善构件的承载力及变形能力, 使得该组合具有延性好、承载力高等特点, 从而可在实际工程中推广应用。

本文作者前期对 CFRP 约束型钢再生混凝土组合柱进行了轴压性能试验研究<sup>[6]</sup>, 在此基础上, 本文

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2021-12-24; 修回日期: 2022-05-19

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51408485); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2022JM-258); 青海省高原绿色建筑与生态社区重点实验室开放基金计划项目(KLKF-2021-001)

**通信作者:** 马辉(1985—), 男, 工学博士, 副教授。研究方向: 钢与混凝土组合结构、混合结构及再生混凝土结构。Email: mahuiwell@163.com

选取合适的本构关系模型,结合 ABAQUS 软件对组合柱进行数值分析,以获取该组合柱的变形特征、荷载-位移曲线、承载力以及应力云图等;将组合柱的计算结果与试验结果作比较,验证了数值模型的合理性,并对组合柱的轴压性能进行参数分析。本文研究结果可为 CFRP 约束型钢再生混凝土组合柱的工程应用提供参考。

1 试验概况

设计制作了 11 个 CFRP 约束型钢再生混凝土组合柱试件,设计参数见表 1。试件截面尺寸为 250mm×180mm,圆角半径为 20mm,截面形式及几何尺寸如图 1 所示。型钢采用 Q235 热轧工字钢,型钢的型号及尺寸见表 2;纵筋和箍筋均采用 HRB400 钢筋,直径分别为 16mm 和 8mm,钢材的力学性能指标见表 3。碳纤维布产自德国慧鱼(Fischer)公司,型号为 FRS-CS-300,其力学性能指标见表 4。再生粗骨料粒径为 5mm~25mm 连续级配,吸水率为 3.4%,表观密度为 2367kg/m<sup>3</sup>,其物理性能满足《混凝土用再生粗骨料》(GB/T 25177—2010)<sup>[7]</sup>,属于 II 类再生骨料。再生混凝土的配合比及基本力学性能指标见表 5。组合柱的轴压性能试验在西安理工大学结构实验室进行,采用 500t 电液伺服压力机进行加载,试验加载装置如图 2 所示,本次试验加载制度采用荷载-位移联合控制的加载方式对试件进行轴心受压加载。

表 1 试件设计参数  
Tab. 1 Design parameters of specimens

| 试件<br>编号 | 柱高 $H$<br>/mm | 再生骨料<br>取代率 $r/\%$ | 再生混凝土<br>等级 | 型钢<br>配钢率 $\rho/\%$ | CFRP 布约束<br>层数 $n$ | 长细比 $\lambda$ | 工字钢<br>型号 |
|----------|---------------|--------------------|-------------|---------------------|--------------------|---------------|-----------|
| CSRRC-1  | 500           | 0                  | C40         | 4.78                | 2                  | 9.6           | 14 号      |
| CSRRC-2  | 500           | 50                 | C40         | 4.78                | 2                  | 9.6           | 14 号      |
| CSRRC-3  | 500           | 100                | C40         | 4.78                | 2                  | 9.6           | 14 号      |
| CSRRC-4  | 500           | 100                | C40         | 4.02                | 2                  | 9.6           | 12 号      |
| CSRRC-5  | 500           | 100                | C40         | 5.80                | 2                  | 9.6           | 16 号      |
| CSRRC-6  | 500           | 100                | C50         | 4.78                | 2                  | 9.6           | 14 号      |
| CSRRC-7  | 500           | 100                | C60         | 4.78                | 2                  | 9.6           | 14 号      |
| CSRRC-8  | 500           | 100                | C40         | 4.78                | 1                  | 9.6           | 14 号      |
| CSRRC-9  | 500           | 100                | C40         | 4.78                | 3                  | 9.6           | 14 号      |
| CSRRC-10 | 1000          | 100                | C40         | 4.78                | 2                  | 19.2          | 14 号      |
| CSRRC-11 | 2000          | 100                | C40         | 4.78                | 2                  | 38.5          | 14 号      |

注:长细比  $\lambda = l_0/i$ ,  $l_0$  为组合柱的计算高度,可取组合柱总高  $L$ ;  $i$  为截面回转半径。

表 2 工字钢规格尺寸  
Tab. 2 I-steel specification sheet

| 型号      | 高度 $h/\text{mm}$ | 翼缘宽度 $b/\text{mm}$ | 腹板宽度 $d/\text{mm}$ | 截面面积 $S/\text{cm}^2$ |
|---------|------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| 12 号工字钢 | 120              | 74                 | 5.0                | 17.8                 |
| 14 号工字钢 | 140              | 80                 | 5.5                | 21.5                 |
| 16 号工字钢 | 160              | 88                 | 6.0                | 26.1                 |

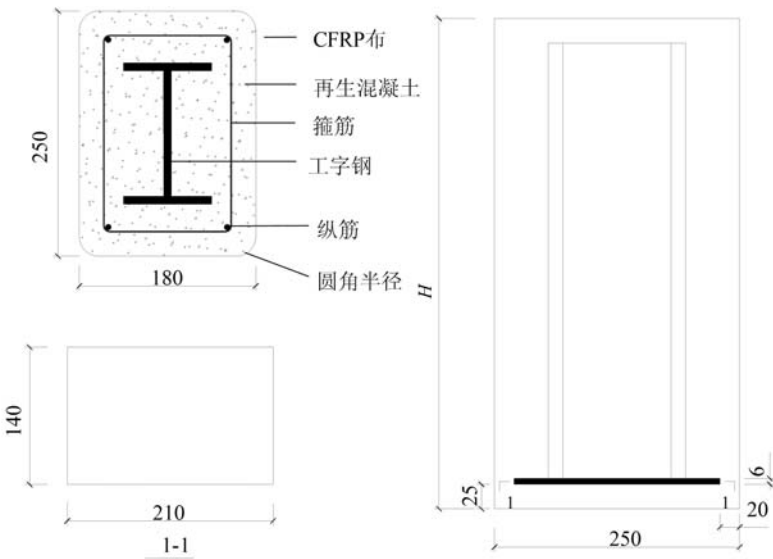


图 1 试件截面形式及尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Section form and size of the specimens tested (unit: mm)



图 2 试验加载装置

Fig. 2 Test loading devices

表 3 钢材力学性能指标

Tab. 3 Mechanical performance indexes of steel

| 钢材类型    |        | 屈服强度<br>$f_y/\text{MPa}$ | 极限强度<br>$f_u/\text{MPa}$ | 弹性模量<br>$E_s/\text{MPa}$ | 屈服应变<br>$\epsilon/\mu\epsilon$ |
|---------|--------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| 14 号工字钢 | 翼缘     | 294.6                    | 367.1                    | $2.04\times 10^5$        | 1444                           |
|         | 腹板     | 374.7                    | 467.6                    | $2.01\times 10^5$        | 1864                           |
| 纵筋      | HRB400 | 579.6                    | 794                      | $2.16\times 10^5$        | 2683                           |
| 箍筋      | HRB400 | 459.3                    | 645                      | $2.10\times 10^5$        | 2187                           |

表 4 碳纤维布材料性能参数指标

Tab. 4 Physical parameters of carbon fiber cloth

| 碳纤维布       | 抗拉强度                 | 受拉弹性                | 伸长率         | 计算厚度          | 单位面积                     |
|------------|----------------------|---------------------|-------------|---------------|--------------------------|
| 型号         | 标准值 $f_t/\text{MPa}$ | 模量 $E_c/\text{MPa}$ | $\delta/\%$ | $t/\text{mm}$ | 质量 $\text{g}/\text{m}^2$ |
| FRS-CS-300 | 3565.2               | $2.4\times 10^5$    | 1.7         | 0.167         | 299.1                    |

表 5 再生混凝土立方体抗压强度

Tab. 5 Mix proportion and cubic compressive strength of recycled concrete

| 再生<br>混凝土<br>强度 | 再生粗<br>骨料取<br>代率<br>$r/\%$ | 水胶<br>比 | 单位体积用量/ $(\text{kg}/\text{m}^3)$ |     |           |           |       |       |       | 立方体<br>抗压强<br>度 $f_{rc}$<br>$/\text{MPa}$ | 弹性<br>模量 $E_{rc}$<br>$/\times 10^4 \text{MPa}$ |
|-----------------|----------------------------|---------|----------------------------------|-----|-----------|-----------|-------|-------|-------|-------------------------------------------|------------------------------------------------|
|                 |                            |         | 水泥                               | 砂   | 天然<br>粗骨料 | 再生<br>粗骨料 | 水     | 粉煤灰   | 减水剂   |                                           |                                                |
|                 | 0                          | 0.411   | 443                              | 576 | 1171      | 0         | 182.1 | 0     | 1.75  | 48.01                                     | 2.790                                          |
| C40             | 50                         | 0.476   | 443                              | 576 | 585.5     | 585.5     | 210.9 | 0     | 1.75  | 45.69                                     | 2.756                                          |
|                 | 100                        | 0.512   | 443                              | 576 | 0         | 1171      | 226.8 | 0     | 1.75  | 43.01                                     | 2.681                                          |
| C50             | 100                        | 0.360   | 358                              | 649 | 0         | 1138      | 163.0 | 94    | 4.782 | 55.6                                      | 2.904                                          |
| C60             | 100                        | 0.312   | 422                              | 528 | 0         | 1072      | 164.5 | 105.4 | 6.3   | 61.20                                     | 3.025                                          |

## 2 组合柱有限元模型的建立

### 2.1 材料本构关系模型

#### 2.1.1 再生混凝土本构关系

##### (1) 混凝土的受压本构关系

部分学者结合试验研究和理论分析<sup>[8,9]</sup>,提出了 FRP(Fibre-reinforced Polymer)约束混凝土的本构模型,根据纤维布约束程度不同,将其划分为强约束与弱约束本构模型(图 3)。

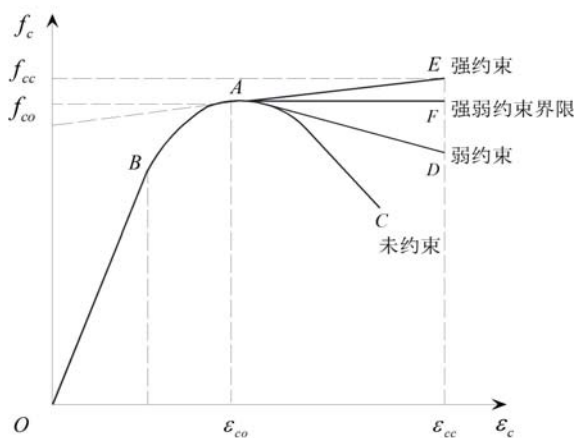


图 3 FRP 约束混凝土典型应力-应变曲线

Fig. 3 Typical stress-strain curves of FRP confined concrete

法见式(2)~(4):

$$\sigma_c = \frac{E_{12} \epsilon_c}{[1 + (E_{12} \epsilon_c / f_0)^{1.5}]^{1/1.5}} + E_2 \epsilon_c \quad (2)$$

$$E_1 = 4733 \sqrt{f'_c}, E_2 = 0.25 \xi_0^{0.6} E_1, E_{12} = E_1 - E_2 \quad (3)$$

$$\xi_0 = A_f E_f / A_c E_c, f_0 = (1 + 1.1 \xi) f'_c, \xi = A_f f_f / A_c f'_c \quad (4)$$

式中:  $A_f$ 、 $A_c$  分别为 FRP、混凝土的横截面面积;  $f_0$  为约束后混凝土抗压强度;  $f_f$  为 FRP 的抗拉强度。

弱约束计算模型采用《混凝土结构设计规范》<sup>[10]</sup>中混凝土受压应力-应变关系进行计算,表达式如下:

当  $x \leq 1$  时,

$$y = \alpha_a x + (3 - 2\alpha_a) x^2 + (\alpha_a - 2) x^3 \quad (5)$$

当  $x > 1$  时,

$$y = \frac{x}{\alpha_d (x - 1)^2 + x}, x = \frac{\epsilon}{\epsilon_c}, y = \frac{\sigma}{f_c^*} \quad (6)$$

##### (2) 混凝土受拉本构关系

本文采用《混凝土结构设计规范》<sup>[10]</sup>给出的混凝土材料受拉应力-应变关系来模拟再生混凝土的受拉行为,表达式如下:

当  $x \leq 1$  时,

$$y = 1.2x - 0.2x^6 \quad (7)$$

当  $x > 1$  时,

$$y = \frac{x}{\alpha_t (x - 1)^{1.7} + x} \quad (8)$$

##### (3) 再生混凝土本构关系

本文采用 Gholampour 等<sup>[11]</sup>提出的通过控制水灰比变量的方法来确定再生混凝土抗压强度及弹性模量,将得到的再生混凝土抗压强度及弹性模量应用于 CFRP 约束普通混凝土本构关系中,从而确定

结合试验结果,本文对各类强弱判别模型进行大量试算,发现 Lam 等<sup>[8]</sup>提出的本构模型适用于本文有限元计算分析。式(1)为纤维布强约束与弱约束的判别条件:

$$\rho_k = \frac{2n t_f E_f}{(f'_c / \epsilon'_c) d} \quad (1)$$

式中:  $\rho_k$  为有效约束比,当  $\rho_k \geq 0.001$  时,混凝土的受压本构模型为强约束,当  $\rho_k < 0.001$  时,混凝土的本构模型为弱约束;  $n$  为 FRP 层数;  $t_f$  为单层纤维布厚度;  $E_f$  为纤维布弹性模量;  $f'_c$ 、 $\epsilon'_c$  分别为混凝土的抗压强度与峰值应变;  $d$  为圆截面直径。

强约束计算模型采用于清<sup>[9]</sup>提出的约束混凝土单轴受压应力-应变关系,具体计算方法见式(2)~(4):

再生混凝土的应力-应变关系曲线。

再生混凝土抗压强度:

$$f'_c = \frac{19.1 \times 0.998^r \times (\omega_{eff}/c + 0.33)}{\omega_{eff}/c^{1.5}} \quad (9)$$

再生混凝土弹性模量:

$$E_c = 0.016 \times (6.1 - 0.015r) \times (5.3 - 1.7\omega_{eff}/c)^{3.9} \quad (10)$$

式中:  $\omega_{eff}/c$  为有效水灰比,  $0.3 < \omega_{eff}/c < 0.8$ ;  $r$  为再生骨料取代率,  $0 < r < 100\%$ 。

## 2.1.2 CFRP 本构关系

碳纤维布由碳纤维原丝压制而成,属于各向异性的弹性材料,本文选用单层板模型定义其各向异性的弹性行为,采用 Hashin 损伤模型模拟 CFRP 材料失效过程。本文建立 CFRP 的局部坐标系,进行单层受力方向以及层与层之间的铺层方向设置。

## 2.1.3 钢材本构关系

钢材本构关系采用二次塑流模型,其应力-应变曲线如图 4 所示。图中,  $f_p$ 、 $f_y$ 、 $f_u$  分别为钢材的比例极限、屈服强度和抗拉强度;  $\sigma_s$  为钢材的应力;  $\epsilon_i$  为钢材的应变;  $E_s$  为钢材的弹性模量。

钢材应力-应变关系曲线的表达式如下:

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \epsilon, & \epsilon \leq \epsilon_e \\ -A\epsilon^2 + B\epsilon + C, & \epsilon_e < \epsilon \leq \epsilon_{e1} \\ f_y, & \epsilon_{e1} < \epsilon \leq \epsilon_{e2} \\ f_y [1 + 0.6 \cdot \frac{\epsilon - \epsilon_{e1}}{\epsilon_{e3} - \epsilon_{e2}}], & \epsilon_{e2} < \epsilon \leq \epsilon_{e3} \\ 1.6 f_y, & \epsilon > \epsilon_{e3} \end{cases} \quad (11)$$

$$\epsilon_e = 0.8 f_y / E_s, \epsilon_{e1} = 1.5 \epsilon_e, \epsilon_{e2} = 10 \epsilon_{e1}, \epsilon_{e3} = 100 \epsilon_{e1} \quad (12)$$

$$A = 0.2 f_y / (\epsilon_{e1} - \epsilon_e)^2, B = 2A\epsilon_{e1}, C = 0.8 f_y + A(\epsilon_e)^2 - B\epsilon_e \quad (13)$$

## 2.2 单元选取及网格划分

CFRP 选用四节点减缩积分的壳单元(S4R);再生混凝土、型钢以及加载端板选用八节点减缩积分实体单元(C3D8R);钢筋选用 Truss 桁架单元(T3D2)。型钢、再生混凝土、纤维布的网格大小均为 15mm;倒角处的网格划分进行加密处理,如图 5 所示。

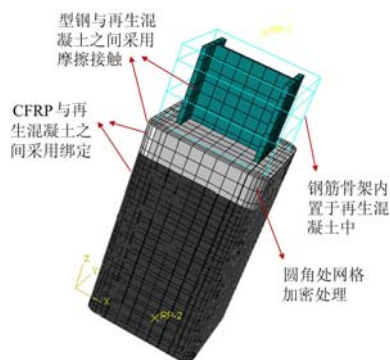


图5 组合柱单元网格划分

Fig. 5 Meshing of composite column elements

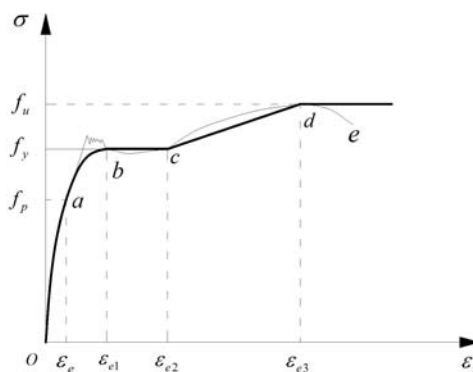


图4 钢材的应力-应变关系

Fig. 4 Stress-strain relationship of steel

## 2.3 相互作用与加载方式

在组合柱数值模型建立过程中,CFRP、再生混凝土、型钢以及钢筋骨架之间的位置关系如图 5 所示,其中型钢与再生混凝土之间的摩擦系数取 0.6<sup>[12]</sup>;由于混凝土本构关系对裂缝模型要求较高,且 CFRP 与再生混凝土界面存在开裂、滑移等多种复杂行为,使得非线性有限元分析时计算收敛相当困难,因此 CFRP 与再生混凝土的界面采用绑定(Tie)约束进行模拟。图 5 中 RP-2、RP-1 为加载点与边界条件控制点。本文有限元分析采用位移加载方式对结构施加荷载,构件底端选用完全固定的方式限制构件产生移动或者转动。对于长细比较大的构件,考虑构件的初始缺陷,对组合柱设置千分之一柱高的初始挠度(取初始偏心  $e_0 = L/1000$ )。



### 3 有限元计算结果分析

#### 3.1 变形特征与应力分布规律

图 6 是将 CSRRC-3 试件的试验破坏特征与有限元模拟最终受力状态作比较,试验破坏时试件多处出现水平褶皱,且呈条状贯穿整个边长范围,主要集中于试件中部;模拟结果反映了试件整体的应力状态,试件中部区域应力较大,说明 CFRP 在此处应力值较大,纤维布对试件的约束作用较强,直至达到纤维布的极限抗拉强度,对应试验中纤维布在此处被拉断。整体上,数值模拟破坏特征与试验破坏特征基本吻合。

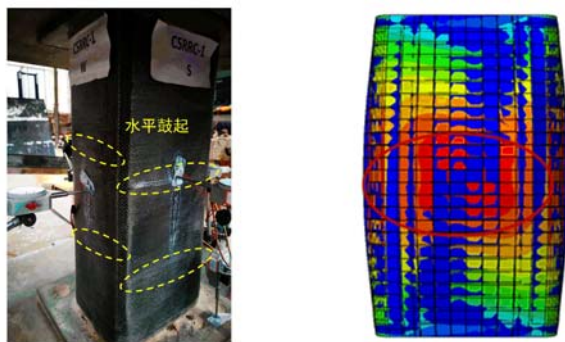


图 6 CSRRC-3 试件破坏模式

Fig. 6 Failure modes of CSRRC-3 specimen

图 7 为试件 CSRRC-3 再生混凝土、型钢、钢筋骨架以及 CFRP 的应力云图。加载初期,再生混凝土的塑性发展较慢,型钢与钢筋的应力与应变仍处于线性变化,CFRP 约束作用尚未有效发挥;随着荷载持续增长,再生混凝土塑性变形程度逐渐加深,型钢与纵筋承受荷载能力迅速增强,随后进入屈服阶段;当达到屈服荷载时,再生混凝土的塑性应变主要集中于试件中部,两端塑性变形较小,此时 CFRP 应变增大明显,表明 CFRP 对再生混凝土发挥了有效约束作用;

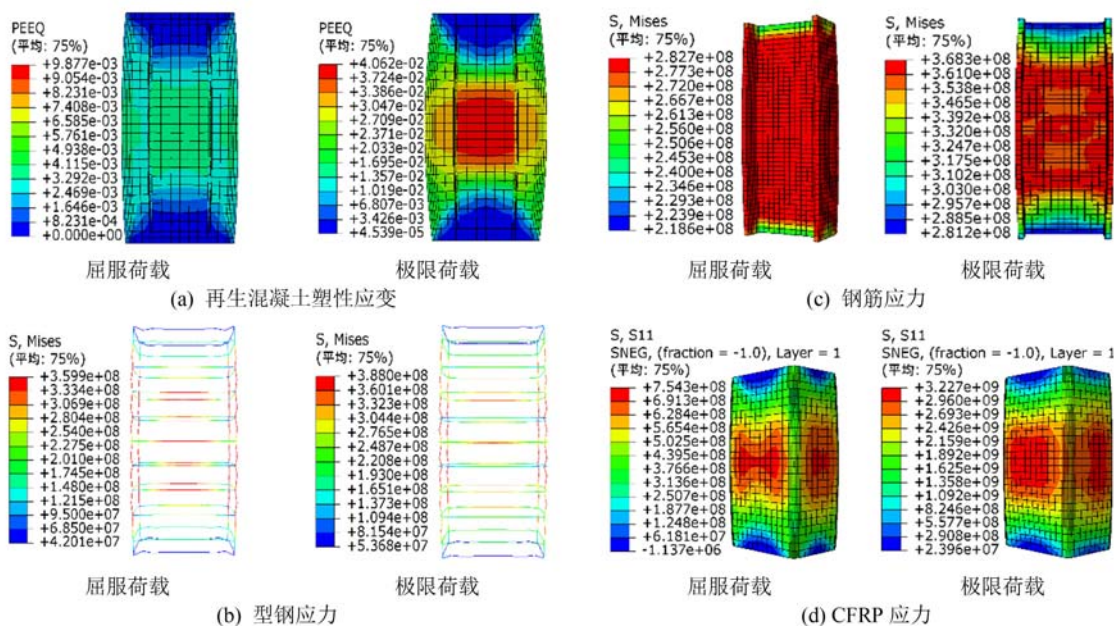


图 7 组合柱中各部件应力云图

Fig. 7 Stress nephogram of components in composite columns

达到峰值荷载时,再生混凝土的塑性变形较为明显,CFRP 环向约束作用提高了再生混凝土的极限压应变,直至核心处再生混凝土被压碎。与屈服荷载相比,峰值荷载时型钢、钢筋以及 CFRP 的应力值分别增加了 85MPa、30MPa、2473MPa,此阶段型钢与钢筋骨架为强化阶段,CFRP 应力涨幅较为明显,表明 CFRP 的约束作用进一步增强,组合柱的极限承载力与极限压应变得得到一定程度的改善。综上,模型计算过程中,型钢、纵筋先后发生屈服,再生混凝土产生较大的塑性变形,CFRP 的环向约束作用逐渐增

强;当碳纤维布达到极限抗拉强度时,组合柱发生破坏,模型计算终止。有限元计算获得的组合柱各部件的应力变化规律与试验破坏特征基本一致,表明本文所建立的数值分析模型能够反映组合柱的受力特性。

### 3.2 计算结果与试验结果的比较

图8为CFRP约束型钢再生混凝土组合柱试验曲线与有限元计算荷载-位移( $P-\Delta$ )曲线对比。由图8可见,大部分计算曲线位于试验曲线上方,其主要原因是数值计算中假定组合柱各部件各向均质,但实际试件时无法保证各向均质,如再生混凝土浇筑、型钢轧制等产生的初始缺陷;CSRRC-10与CSRRC-11试件为长细比作为参数变量,模拟时设置了千分之一柱高的初始挠度,导致计算结果低于试验结果。总体上,组合柱的有限元计算曲线与试验曲线的发展趋势较为一致,吻合程度较高。

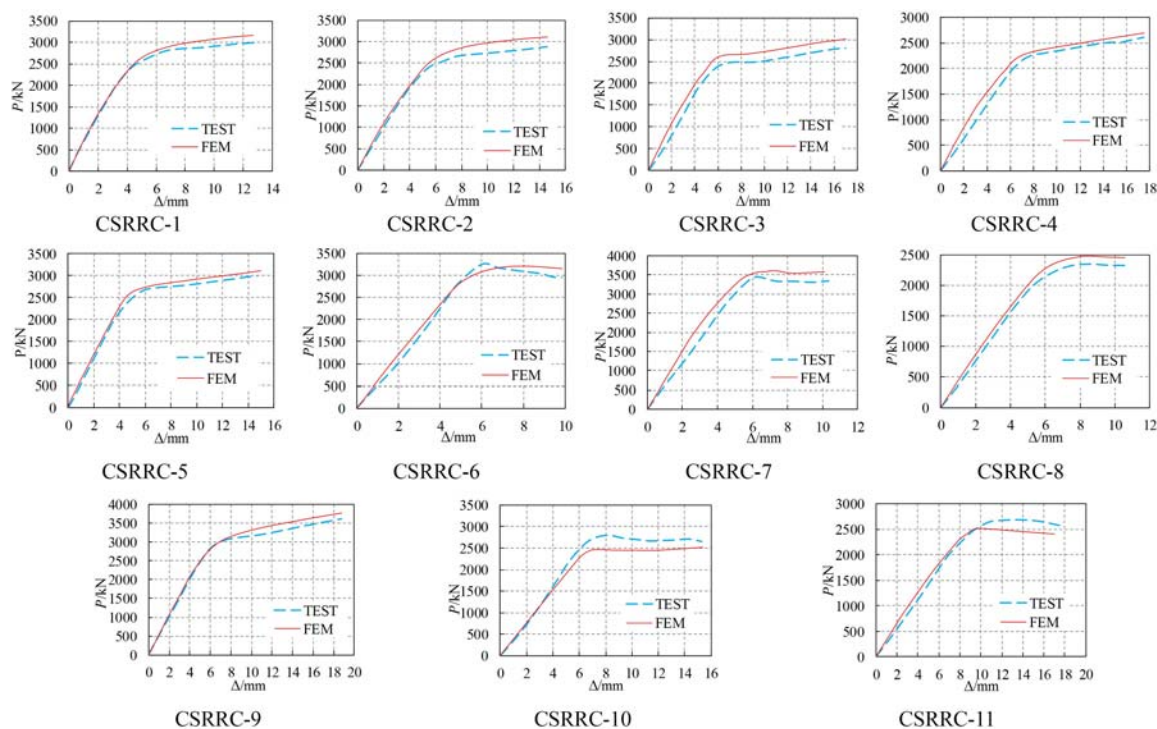


图8 组合柱荷载-位移对比图

Fig. 8 Load displacement comparison diagram of composite columns

表6为组合柱的轴压试验特征值与有限元计算特征值,其中屈服荷载的相对误差平均值为4.47%,标准方差为0.025;峰值荷载的相对误差平均值为5.60%,标准方差为0.02。由表6可见,有限元计算值与试验值相差较小,证明了有限元模型建立的合理性。

### 3.3 有限元参数拓展分析

图9为再生骨料取代率、再生混凝土强度、碳纤维布层数、长细比、截面高宽度以及圆角半径等参数对CFRP约束型钢再生混凝土组合柱轴压性能的影响规律。

(1) 由图9(a)可知,增加碳纤维布层数可有效提高构件的初始刚度;对于未受CFRP约束的组合柱而言,构件达到屈服荷载时其承载力逐渐降低;与未约束构件相比,CFRP包裹层数为1层、2层、3层的构件承载力分别提高约17.2%、34.4%、55.2%,型钢屈服速率减缓,型钢屈曲得到较大程度的限制,构件的变形能力提高了近50%。本文试验研究和数值分析结果表明,纤维布的环向约束作用使得组合柱在轴压荷载作用下处于三向受压状态,提高了核心区再生混凝土的抗压强度,从而增强了组合柱的变形能力和承载力。另外,CFRP包裹层数为4~5层时,承载力增幅较小,因此建议纤维布包裹层数为2~3层,约束作用最佳且经济效应最优。

表 6 组合柱轴压试验特征值与有限元计算特征值

Tab. 6 Comparison of bearing capacity test value and calculated value of composite columns

| 试件<br>编号 | 屈服荷载试验<br>值 $N_{ye}/\text{kN}$ | 峰值荷载试验<br>值 $N_{ue}/\text{kN}$ | 屈服荷载计算<br>值 $N_{yc}/\text{kN}$ | 峰值荷载计算<br>值 $N_{uc}/\text{kN}$ | 屈服荷载相对<br>误差 $\delta_1/\%$ | 峰值荷载相对<br>误差 $\delta_2/\%$ |
|----------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| CSRRC-1  | 2800.28                        | 2998.24                        | 2908.94                        | 3164.31                        | 3.89                       | 5.54                       |
| CSRRC-2  | 2400.01                        | 2889.72                        | 2558.12                        | 3109.37                        | 6.59                       | 7.60                       |
| CSRRC-3  | 2488.74                        | 2806.62                        | 2525.23                        | 3003.9                         | 7.78                       | 7.03                       |
| CSRRC-4  | 2231.38                        | 2610.40                        | 2272.8                         | 2701.34                        | 1.86                       | 3.48                       |
| CSRRC-5  | 2653.80                        | 2997.90                        | 2721.47                        | 3110.46                        | 2.55                       | 3.75                       |
| CSRRC-6  | 3243.91                        | 2944.22                        | 3102.65                        | 3149.65                        | 4.55                       | 7.00                       |
| CSRRC-7  | 3345.68                        | 3351.43                        | 3547.02                        | 3605.22                        | 6.02                       | 7.60                       |
| CSRRC-8  | 2322.02                        | 2328.79                        | 2457.57                        | 2450.89                        | 5.84                       | 5.20                       |
| CSRRC-9  | 2975.31                        | 3445.14                        | 2953.18                        | 3622.50                        | 0.74                       | 9.30                       |
| CSRRC-10 | 2600.71                        | 2719.59                        | 2450.00                        | 2513.18                        | 6.15                       | 8.21                       |
| CSRRC-11 | 2541.37                        | 2571.25                        | 2511.704                       | 2406.951                       | 1.18                       | 6.80                       |

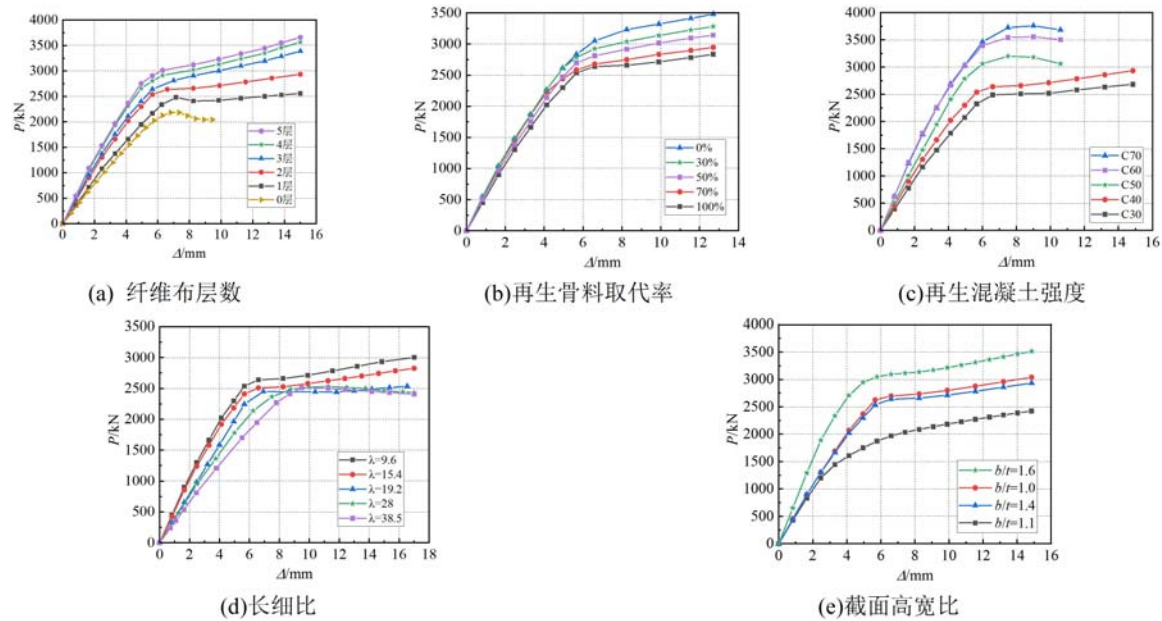


图 9 设计参数对组合柱轴压试件荷载-位移曲线的影响

Fig. 9 Effect of design parameters on load-displacement curves of eccentrically loaded composite columns

(2) 由图 9(b)可知,不同再生粗骨料取代率下组合柱的初始刚度基本相当,其荷载-位移关系曲线变化趋势相同。再生骨料取代率的增大对组合柱的承载力产生不利作用,取代率为 30%、50%、70%、100%时,与普通混凝土相比,承载力分别降低了 5.6%、10.7%、15.3%、18.5%;另外,取代率对构件的变形能力影响较小,说明 CFRP 的约束作用可以改善组合柱的变形能力。总体上,再生粗骨料的应用对构件的力学性能是不利的,建议取代率取 50%较为合理。

(3) 由图 9(c)可知,以再生混凝土强度等级为 C30 的构件为基准,C40、C50、C60、C70 构件的峰值荷载分别增长了 9.3%、19.2%、32.5%、40.0%,表明提高再生混凝土的强度对构件的承载力是有利



的,但会使组合柱的荷载-位移曲线下降段更为陡峭,即构件的变形能力降低。

(4) 图 9(d)显示了长细比对组合柱荷载-位移曲线的影响,加载初期试件的承载力与变形之间呈线性变化,达到屈服荷载后,纤维布约束作用对试件的承载力及延性提升幅度较大,其荷载-位移关系曲线呈上升状态;长细比  $\lambda=28$ 、 $\lambda=38.5$  时,由于纵向弯曲的影响,导致其承载力降幅明显,此时纤维布的约束作用较弱,其荷载-位移曲线逐渐下降,故设计合理的长细比才能使纤维布发挥有效作用。

(5) 由图 9(e)可知,截面高宽比  $b/t$  ( $b$  为截面高度,  $t$  为截面宽度) 为 1 与 1.4 试件的面积相同、截面高宽比不同,在受力过程中,两个试件的初始刚度基本一致;达到极限荷载时,高宽比为 1 的试件承载力较大,说明 CFRP 对方形柱的约束效果较好;截面高宽比分别为 1.1、1.4、1.6 试件的面积不同、截面高宽比也不同,随着高宽比的增加,试件的初始刚度逐渐增大,相同宽度条件下截面高度每增加 50mm,承载力约提高 30%;另外,在 CFRP 的约束作用下,当截面高宽比为 1.1 时,试件的极限荷载比屈服荷载提高了 25%;当截面高宽比为 1.6 时,试件的极限荷载比屈服荷载提高了 17%,可见,随着截面高宽比的增大,CFRP 对组合柱的约束能力逐渐减弱。

#### 4 组合柱的承载力计算方法

结合已有的强度模型与高宽比影响系数<sup>[13,14]</sup>,本文将 Gholampour 等<sup>[11]</sup>提出的再生混凝土强度模型引入到 CFRP 约束后混凝土抗压强度的计算模型当中。由于 CFRP、型钢以及钢筋骨架会对再生混凝土截面产生约束不均匀的情况,因此本文对组合柱截面划分约束区域,将再生混凝土、型钢以及钢筋骨架对组合柱的贡献进行叠加。再生混凝土抗压强度的计算公式如下:

$$\frac{f'_c}{f'_{c0}} = 1 + 6 \left( \frac{2d}{h} \right) \frac{f'_l}{f'_{c0}} \left( \frac{h}{b} \right)^{-0.81}, f'_l = \frac{2(b+h)n_s t_s f_{frp}}{bh} \quad (14)$$

$$f'_{c0} = \frac{19.1 \times 0.998^r \times (\omega_{eff}/c + 0.33)}{\omega_{eff}/c^{1.5}}, C = 0.8f_y + A(\epsilon_e)^2 - B\epsilon_e \quad (15)$$

式中:  $n_s$  为 CFRP 层数;  $t_s$  为 CFRP 单层厚度;  $f_{frp}$  为 CFRP 抗拉强度;  $d$  为矩形截面圆角半径;  $r$  为再生骨料取代率;  $\omega_{eff}/c$  为水灰比。

基于 Chen 等<sup>[14]</sup>提出的型钢约束混凝土模型,本文组合柱的截面约束区域划分如图 10 所示。

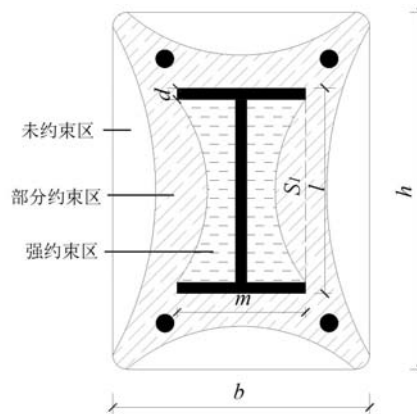


图 10 CFRP 约束型钢再生混凝土截面约束区域

Fig. 10 Confined area of recycled concrete section with CFRP confined steel

未约束区域的计算公式为

$$A_{cu} = \frac{1}{3} \frac{b}{h} (h-2d)^2 + \frac{1}{3} \frac{h}{b} (b-2d)^2 \quad (16)$$

部分约束区域面积计算公式为

$$A_{cp} = A - A_s - A_y - A_{cu} \quad (17)$$

强约束区域面积计算公式为

$$A_{dh} = lm - 2S_l - A_s, S_l = \frac{1}{12} (l - 2t')^2 \quad (18)$$

式中:  $A_{dh}$  为高强约束区域;  $A_s$  为型钢的截面面积;  $t'$  为型钢腹板宽度。

考虑长细比的影响因素, 运用叠加原理后组合柱的轴压承载力计算表达式为

$$N_c = 0.9\varphi(f_y A_y + f_s A_s + f_{cu} A_{cu} + f_{cp} A_{cp} + f_{dh} A_{dh}) \quad (19)$$

$$\varphi = 0.994 - 0.358\eta + 0.163\eta^2 \quad (20)$$

式中:  $f_y$ 、 $f_s$  为型钢、纵筋的强度设计值;  $f_{cu}$ 、 $f_{cp}$ 、 $f_{dh}$  为未约束区、部分约束区、强约束区混凝土抗压强度;  $f_{cp} = f_{cu}$ ,  $f_{dh} = 1.1f_{cp}$ ;  $A_y$ 、 $A_s$  为型钢、纵筋的截面面积;  $A_{cu}$ 、 $A_{cp}$ 、 $A_{dh}$  为未约束区、部分约束区、强约束区混凝土面积;  $\varphi$  为长细比影响系数, 其中  $\eta = 0.003 \times (L/i)$ 。

CFRP 约束型钢再生混凝土组合柱轴压承载力的计算值与试验值的对比见表 7。由表 7 可知, 组合柱的计算值与试验值相对误差较小, 误差平均值为 0.045, 方差为 0.002, 表明采用约束区域划分方法与叠加法相结合建立的 CFRP 约束型钢再生混凝土组合柱轴压承载力计算公式较为合理。

表 7 组合柱试验值与公式计算值

Tab. 7 Test value and formula calculation value of composite column

| 试件编号     | RAC 强度等级 | $r/\%$ | $\lambda$ | $\rho/\%$ | $n$ | 计算值 $N_c/\text{kN}$ | 试验值 $N_u/\text{kN}$ | $N_c/N_u$ |
|----------|----------|--------|-----------|-----------|-----|---------------------|---------------------|-----------|
| CSRRC-1  | C40      | 0      | 9.6       | 4.78      | 2   | 2910.22             | 2998.24             | 0.97      |
| CSRRC-2  | C40      | 50     | 9.6       | 4.78      | 2   | 2850.00             | 2889.72             | 0.98      |
| CSRRC-3  | C40      | 100    | 9.6       | 4.78      | 2   | 2690.89             | 2806.62             | 0.96      |
| CSRRC-4  | C40      | 100    | 9.6       | 4.02      | 2   | 2624.13             | 2610.40             | 1.01      |
| CSRRC-5  | C40      | 100    | 9.6       | 5.80      | 2   | 2721.20             | 2997.90             | 0.91      |
| CSRRC-6  | C50      | 100    | 9.6       | 4.78      | 2   | 2806.36             | 2944.22             | 0.95      |
| CSRRC-7  | C60      | 100    | 9.6       | 4.78      | 2   | 3152.31             | 3351.43             | 0.94      |
| CSRRC-8  | C40      | 100    | 9.6       | 4.78      | 1   | 2467.14             | 2328.79             | 1.06      |
| CSRRC-9  | C40      | 100    | 9.6       | 4.78      | 3   | 3035.58             | 3445.14             | 0.88      |
| CSRRC-10 | C40      | 100    | 19.2      | 4.78      | 2   | 2582.12             | 2719.59             | 0.95      |
| CSRRC-11 | C40      | 100    | 38.5      | 4.78      | 2   | 2447.27             | 2571.25             | 0.94      |

## 5 结 论

(1) CFRP 约束型钢再生混凝土组合柱由数值模拟分析得到的应力变化规律与试验破坏特征基本吻合, 试验特征值与计算特征值相差不大, 从而验证了有限元模型的合理性。

(2) 在轴压荷载作用下, 组合柱中再生混凝土发生塑性变形, 随后型钢、钢筋相继屈服, CFRP 的约束作用限制了再生混凝土的塑性发展, 最终 CFRP 达到极限拉应变被拉断而导致组合柱发生破坏。

(3) 纤维布的约束作用有效改善了组合柱的承载力与延性, 相比于无 CFRP 约束作用的试件, 包裹 2 层纤维布试件中再生混凝土的应力值提高了 2 倍, 组合柱的承载力提高约 52%; 而包裹 3 层以上纤维布时, 组合柱的承载力增幅减小, 因此建议包裹 2 层 CFRP 为最优。随着长细比的增大, CFRP 及型钢对再生混凝土的约束能力逐渐降低, 进而组合柱的承载能力逐渐下降, 其中承载力最大降幅约为 19.8%。

(4) 提高再生混凝土强度使得组合柱的承载力最大增幅约 11%, 但延性逐渐降低; 再生粗骨料取代率的增加导致组合柱的承载力逐渐降低, 承载力最大降幅为 13%; 另外, 截面宽度相同条件下, 截面高度每增加 50mm, 构件承载力增大约 30%。

(5) 采用叠加法提出 CFRP 约束型钢再生混凝土柱轴压承载力公式, 将计算结果与试验结果进行

对比,发现计算结果偏于保守,但整体吻合较好。

#### 参考文献:

- [1] 肖建庄,李佳彬,兰阳. 再生混凝土技术研究最新进展与评述[J]. 混凝土, 2003(10):17—20, 57 (XIAO Jianzhuang, LI Jiabin, LAN Yang. Research on recycled aggregate concrete-A review[J]. Concrete, 2003(10):17—20 (in Chinese))
- [2] 薛建阳,崔卫光,陈宗平,等. 型钢再生混凝土组合柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构, 2013, 43(7):73—76 (XUE Jianyang, CUI Weiguang, CHEN Zongping, et al. Experimental study on axial compression behavior of steel reinforced recycled aggregate concrete composite columns[J]. Journal of Building Structure, 2013, 43(7):73—76 (in Chinese))
- [3] 马辉,张鹏,厉嘉鑫,等. GFRP管型钢再生混凝土组合柱轴压性能及承载力计算[J]. 实验力学, 2019, 34(3):467—477 (MA Hui, ZHANG Peng, LI Jiaxin, et al. Axial compression performance and bearing capacity calculation of GFRP tube filled with steel-reinforced recycled concrete composite column [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(3):467—477 (in Chinese))
- [4] Teng J G, Asce M, Zhao J L, et al. Behavior of FRP-confined compound concrete containing recycled concrete lumps[J]. Journal of Composite s for Construction, 2016, 20(1):1—13.
- [5] Huang L, Yu T, Zhang S S, et al. FRP-confined concrete-encased cross section steel columns: concept and behaviour[J]. Engineering Structures, 2017, 152(12):348—358.
- [6] 黄成. CFRP约束型钢再生混凝土柱轴压力学性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020 (HUANG Cheng. Study on the behavior of CFRP confined steel reinforced recycled concrete column under axial compression[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020 (in Chinese))
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 混凝土用再生粗骨料:GB/T 25177—2010 [S]. 北京:中国标准出版社, 2010 (General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standardization Administration of China. Recycled coarse aggregate for concrete: GB/T 25177—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010 (in Chinese))
- [8] Lam L, Teng J G. Design-oriented stress-strain model for FRP- confined concrete in rectangular columns[J]. Construction and Building Materials, 2009, 17(6):471—489.
- [9] 于清. 轴心受压FRP约束混凝土的应力-应变关系研究[J]. 工业建筑, 2001, 31(4):5—8 (YU Qing. Stress-strain relationship of FRP confined concrete subjected to axial compression[J]. Journal of Industrial Construction, 2001, 31(4):5—8 (in Chinese))
- [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 (Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures(GB 50010—2002)[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2002 (in Chinese))
- [11] Gholampour A, Gandomi A H, Ozbakkaloglu T. New formulations for mechanical properties of recycled aggregate concrete using gene expression programming[J]. Construction and Building Materials, 2017, 130(3):122—145.
- [12] 刘威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究[D]. 福州: 福州大学, 2005 (LIU Wei. Research on mechanism of concrete-filled steel tube subjected local compression[D]. Fuzhou: Fuzhou Universty, 2005 (in Chinese))
- [13] Mirmiran A, Shahawy M, Samaan M, et al. Effect of column parameters on FRP-confined concrete[J]. Journal of Composites for Construction, 1998, 2(4):175—185.
- [14] Chen C C, Lin N J. Analytical model for predicting axial capacity and behavior of concrete encased steel composite stub columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62(5):424—433.

## Finite element analysis on axial compression behavior of CFRP confined steel reinforced recycled concrete composite columns

MA Hui<sup>1</sup>, YANG Fanting<sup>2</sup>, HUANG Cheng<sup>1</sup>, A Xin<sup>3,4</sup>

(1. State Key Laboratory of ECO-Hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China; 2. Henan Urban Planning Institute and Corporation, Zhengzhou 450044, Henan, China; 3. Qinghai Building and Materials Research Co., Ltd., Xining 810008, Qinghai, China; 4. Qinghai Provincial Key Laboratory of Plateau Green Building and Eco-community, Xining 810008, Qinghai, China)

**Abstract:** Based on the axial compression test of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) confined steel reinforced recycled concrete composite columns (CSRRC), the nonlinear analysis of composite columns was carried out by using ABAQUS software. Considering the effects of fiber cloth layers, recycled coarse aggregate (RCA) replacement rates, the compressive strength of recycled aggregate concrete, steel ratio and slenderness ratio on the axial compression performance of composite columns, the deformation diagram, stress nephogram and load-displacement curve of the composite column were obtained. The calculated results were in perfect accord with the experimental results, which verified the rationality of the numerical model, and the parameter expansion analysis of the composite column was carried out. The results show that the recycled concrete deforms first, then the section steel and longitudinal reinforcement yield successively, and finally the CFRP reached the ultimate tensile strength, and the calculation was terminated. The increase of the replacement rate of RAC has an adverse effect on the mechanical performance of members. With the increase of recycled concrete strength, the bearing capacity of members increases greatly, but the ductility becomes worse. The number of fiber cloth layers has a significant effect on the bearing capacity and deformation capacity of composite columns, and the maximum increase of axial bearing capacity is 55.2%. The increase of slenderness ratio has an adverse effect on the axial compression performance of composite columns. Based on the superposition principle, the calculation formula of axial compressive bearing capacity of CSRRC is proposed. The research conclusion provides a technical reference for the application of CSRRC.

**Keywords:** carbon fiber; steel reinforced recycled concrete; composite columns; axial compression behavior; finite element analysis