

文章编号:1005-0523(2018)03-0083-08

钢筋增强 ECC 柱偏心受压力学性能研究

陈梦成,周丰流,袁方

(华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013)

摘要:为进一步研究钢筋与 ECC 的共同工作性能,对钢筋增强 ECC 柱偏心受压力学性能进行了研究。首先,提出 ECC 材料简化本构模型,采用数值积分法对构件在偏心受压状态下的力学性能进行分析。理论结果与试验结果吻合良好,验证了该方法的可靠性。其次,基于该方法分析了不同配筋率、偏心距及 ECC 抗压强度等参数对构件在偏心受压时力学性能的影响。最后,对 R/ECC 柱和钢筋混凝土(RC)柱的承载力 N_u-M_u 关系曲线进行了对比分析,R/ECC 柱承载力 N_u-M_u 关系曲线更加饱满。

关键词:R/ECC 柱;偏心受压;弯矩-曲率;数值积分

中图分类号:TU398.9

文献标志码:A

19 世纪 20 年代波特兰水泥问世以来,混凝土材料因其具有取材方便、抗压强度高和与钢筋的粘结性能好等优点在世界各地得到了广泛的运用^[1],然而,混凝土抗压不抗拉的缺点往往造成构件受拉部分容易产生裂缝,一旦混凝土构件产生裂缝,将使构件内部钢筋裸露在外面,从而加速钢筋的锈蚀;进而造成混凝土膨胀开裂,严重影响结构的寿命。近年来,一种高延性纤维增强水泥基复合材料(engineered cementitious composite, ECC)得到了迅速发展并广泛应用于工程结构^[2]。鉴于 PVA 的价格比较昂贵,研究表明纤维体积掺量为 2%时的 ECC 材料性价比最优。此时 ECC 材料的极限拉应变远远超过混凝土,不仅能稳定地超过 3%,有的甚至可以达到 5%;即使处在极限拉应变时,ECC 材料平均裂缝宽度也可以稳定的控制在 60 μm 左右,有的甚至可以控制在 40 μm 以下;因此无论是延性还是耐久性,ECC 材料相对于混凝土都要更加优越。ECC 与混凝土具有类似的抗拉强度(4~6 MPa)及抗压强度(30~80 MPa),在单轴拉伸荷载作用下,不同于普通混凝土开裂之后承载力开始下降,ECC 在开裂之后承载力反而能够继续增加,并通过多裂缝开展实现应变硬化行为^[2]。每一条细裂缝开展到约 60 μm 时便保持稳定,通过桥联作用将应力传递给基体,促使新裂缝不断出现,直至裂缝开展达到饱和状态后,其中一条裂缝宽度才迅速增加进而进入拉伸软化段。一般来说,ECC 在拉伸应变达到 3%以后才开始进入拉伸软化段,极限状态下主裂缝宽度低于 100 μm ^[2]。在单轴压缩荷载作用下,ECC 峰值压力对应的应变约为 0.004,约为混凝土的两倍^[3]。因此,对于重要建筑可以使用 ECC 来提高其耐久性。另外 ECC 与钢筋混合使用能够减小界面粘结应力并避免界面劈裂裂缝的产生,并且能够有效控制裂缝宽度^[4]。柱构件是建筑结构的主要受力构件,柱构件一旦破坏往往很难修复,严重破坏时会对整个建设结构产生威胁,容易造成人们财产损失和生命安全问题。因此,有必要以 R/ECC 柱为研究对象,对其在偏压荷载作用下的力学性能进行系统研究;旨在对 R/ECC 柱在偏心受压荷载作用下进行力学性能的分析。

收稿日期:2018-02-09

基金项目:国家自然科学基金项目(51608199);江西省优势科技创新项目(20152BCB24006);江西省自然科学基金项目(20161BAB216140)

作者简介:陈梦成(1962—),男,教授,博士生导师,研究方向为工程结构材料耐久性,组合结构。

1 应力-应变关系

为了研究钢筋增强 ECC 柱在偏心荷载下受压的力学性能,为简化构件受力过程分析,采用以下假设:

- 1) 在任何受力阶段都符合平截面假定;
- 2) 忽略剪切变形的影响,计算过程中不考虑混凝土抗拉作用;
- 3) 钢筋采用理想弹塑性双折线模型表示;
- 4) ECC 的单轴拉伸应力应变关系用两段式表示,单轴受压应力应变曲线用四段式表示;
- 5) 不考虑钢筋与混凝土和钢筋与 ECC 之间的粘结滑移。

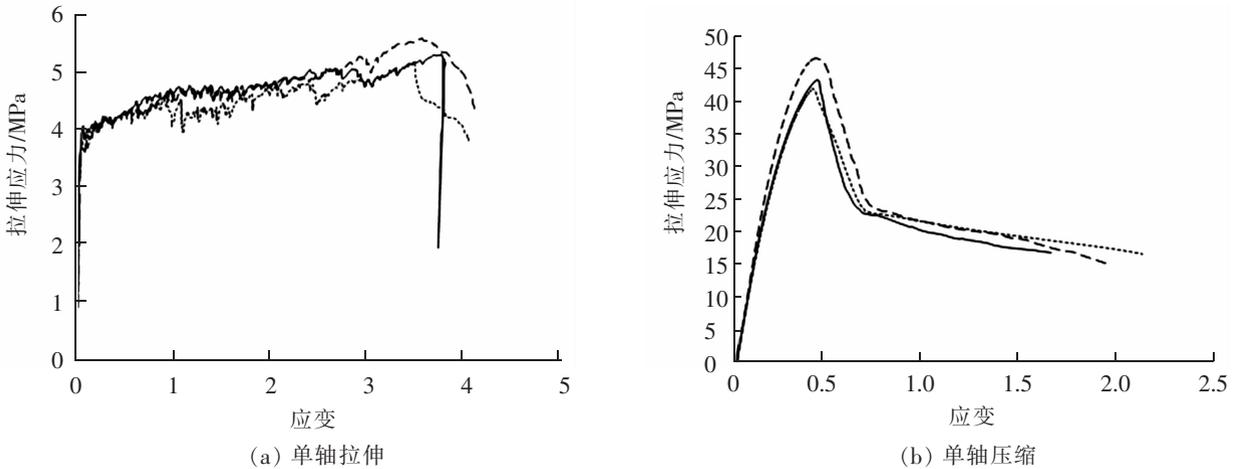


图 1 ECC 本构关系

Fig.1 Test results of stress-strain curves of ECC

1.1 ECC 应力-应变关系

从图 1(a)中可以明显的看出 ECC 极限拉应变能够稳定的超过 3%,峰值拉应力能够达到 5 MPa 以上,可以说明 ECC 具有优越的延性。从图 1(b)中可以看出 ECC 在峰值压应力时的压应变大约为 0.004,而混凝土的峰值应变约为 0.002,混凝土的峰值应变只有 ECC 峰值应变的一半。而且 ECC 的极限压应变(0.018)也远远大于普通混凝土的极限压应变(0.006)。

对试验值进行拟合,通过简化模型来表征其本构关系,如图 2 所示。模拟过程中采用线性来简化曲线,ECC 受拉应力-应变曲线可采用双线性表示为:

$$\sigma_t = \frac{\sigma_{tc}}{\varepsilon_{tc}} \varepsilon \quad 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{tc} \quad (1)$$

$$\sigma_t = \sigma_{tc} + (\sigma_{tu} - \sigma_{tc}) \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{tc}}{\varepsilon_{tu} - \varepsilon_{tc}} \right) \quad \varepsilon_{tc} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{tu} \quad (2)$$

式中: σ_{tc} 为 ECC 开始开裂时的强度; ε_{tc} 为 ECC 开始开裂时的应变; ε_{tu} 为极限受拉的应力; σ_{tu} 为极限拉应力时对应的拉应变。

ECC 受压应力-应变曲线^[5]可表示为:

$$\sigma_c = \begin{cases} E_0 \varepsilon & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{0.4} \\ E_0 \varepsilon (1 - \alpha) & \varepsilon_{0.4} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{c0} \\ \sigma_{c0} - 0.5 \sigma_{c0} \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{c0}}{0.5 \varepsilon_{c0}} \right) & \varepsilon_{c0} \leq \varepsilon \leq 1.5 \varepsilon_{c0} \\ \frac{0.5 \sigma_{c0}}{1.5 \varepsilon_{c0} - \varepsilon_{cu}} (\varepsilon - \varepsilon_{cu}) & 1.5 \varepsilon_{c0} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{cu} \end{cases} \quad (3)$$

式中: E_0 为 ECC 的弹性模量; σ_{c0} 为峰值应力; ε_{c0} 为峰值应变; ε_{cu} 为极限压应变; $\varepsilon_{0.4}$ 为上升段 40%极限强度

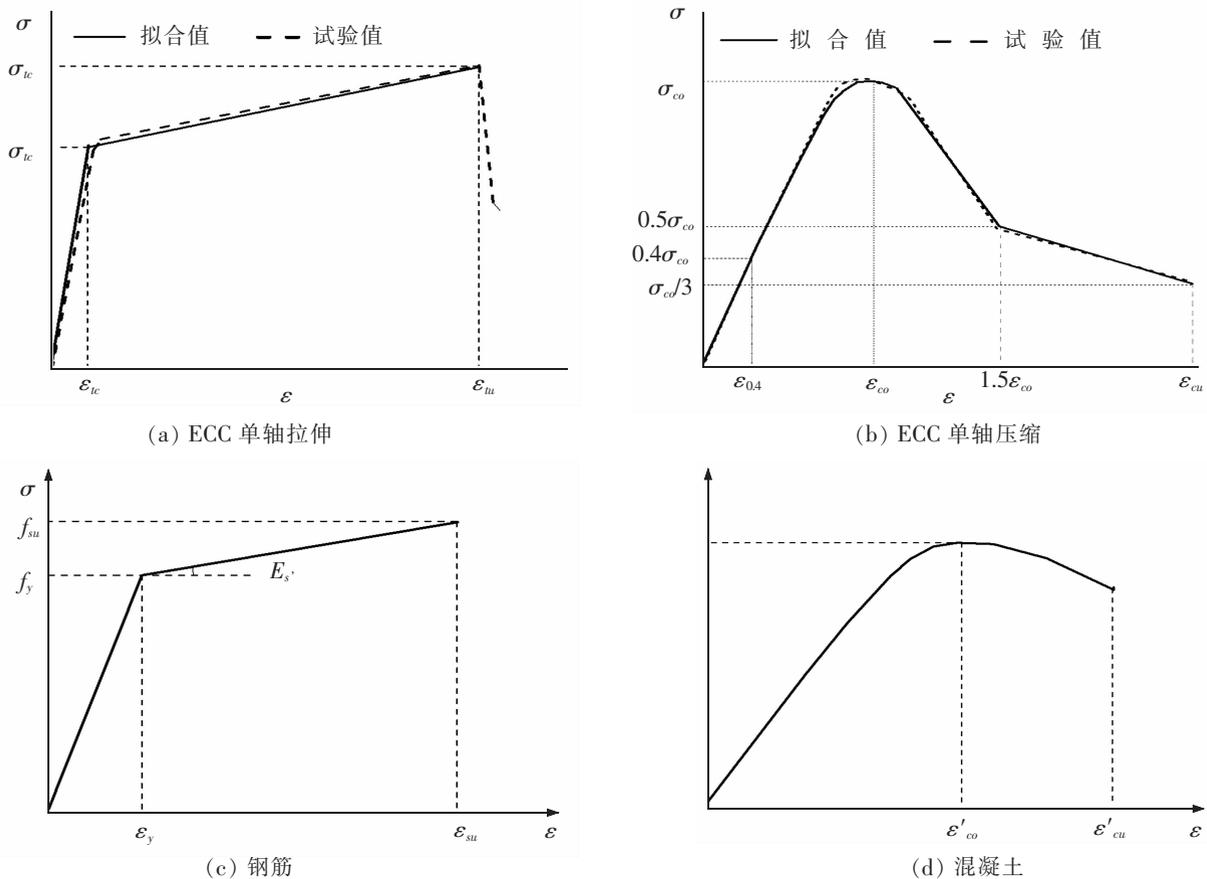


图 2 材料应力-应变曲线
Fig.2 Stress-strain relationship

对应的应变,等于 $0.4\sigma_{co}/E_0$; α 为非线性上升段的弹性模量折减系数,可由下式表示

$$\alpha = \frac{a\epsilon E_0}{\sigma_{co}} - b \tag{4}$$

其中: a, b 为常数,通过试验数据拟合,取值分别为 0.308 和 0.124。

1.2 钢筋应力-应变关系

图 2(c)为钢筋应力-应变曲线图^[6],采用双斜线弹塑性模型,表达式如下

$$\sigma_s = E_s \epsilon_s \quad \epsilon_s \leq \epsilon_y \tag{5}$$

$$\sigma_s = f_y + (\epsilon_s - \epsilon_y) E_s' \quad \epsilon_y \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{su} \tag{6}$$

$$E_s' = \frac{f_{su} - f_y}{\epsilon_{su} - \epsilon_y} \tag{7}$$

式中: f_y 为钢筋屈服强度; ϵ_y 为钢筋屈服应变; f_{su} 为钢筋极限拉应力; ϵ_{su} 为钢筋极限拉应变; E_s 为钢筋未屈服前的应力-应变曲线斜率; E_s' 为钢筋屈服后的应力-应变曲线斜率。

1.3 混凝土应力-应变关系

混凝土采用 Hognestad^[7]提出的受压应力-应变曲线,如图 2(d)所示。上升段为二次抛物线,下降段为斜直线,可表示为

$$\sigma_c = f_c \left[\frac{2\epsilon}{\epsilon_{c0}'} - \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{c0}'} \right)^2 \right] \quad 0 \leq \epsilon \leq \epsilon_{c0}' \tag{8}$$

$$\sigma_c = f_c \left[1 - \left(\frac{\epsilon - \epsilon_{c0}'}{\epsilon_{cu}' - \epsilon_{c0}'} \right) \right] \quad \epsilon_{c0}' \leq \epsilon \leq \epsilon_{cu}' \tag{9}$$

式中: ε_{c0}' 为混凝土峰值应变,取 0.002; ε_{cu}' 为混凝土的极限压应变,取 0.006; f_c 为混凝土的峰值应力。

2 数值结果验证

模拟的过程采用数值积分法,运用数值分析软件 MATLAB 编制程序,根据截面的力平衡进行计算,计算得到柱在偏心荷载下的全过程弯矩-曲率曲线。值得注意的是大多数文献对于 ECC 材料的研究比较集中在 ECC 梁,而对于 ECC 柱的数值研究开展较少。对于模拟一般的 ECC 梁,数值积分的时候大多数都是以截面底部的纤维拉应变为最开始的应变,通过变换拉应变,设置增量步,得到不同拉应变下的中和轴高度 c ,通过底部拉应变与中和轴高度之比计算得到截面曲率^[8-9]。这种方法适合应用于偏心受压柱偏心距较大时,而不适合偏心距较小时,因小偏心时截面在最开始受力就处于全截面受压状态,也就是截面底部的拉应变为负值。因此为了避免这种情况,同时为了方便数值积分计算,本文采用以截面顶部纤维压应变为开始应变,通过力平衡计算得到中和轴高度 c ,再根据平截面假定,计算得到截面底部的应变。设置增量步,不断变换压应变值,得到各个压应变下的弯矩和曲率,直至压应变达到极限压应变,从而得到了构件截面在受压荷载下所有的弯矩和曲率。

图 3 是沿截面高度的应力应变分布。材料的简化本构关系和理论模型的基本假定均与本文第二节介绍的相同。对截面进行受力分析,在轴力 N 和弯矩 M 的共同作用下,由力平衡和力矩平衡可得以下方程

$$\int_h^a b\sigma_1(x)dx + \int_a^c b\sigma_2(x)dx + \int_c^e b\sigma_3(x)dx + \int_e^f b\sigma_4(x)dx + \int_f^g b\sigma_5(x)dx + \int_g^d b\sigma_6(x)dx + \sigma_s A_s - \sigma_s' A_s' + N_u = 0 \quad (10a)$$

$$\int_h^a b\sigma_1(x)xdx + \int_a^c b\sigma_2(x)xdx + \int_c^e b\sigma_3(x)xdx + \int_e^f b\sigma_4(x)xdx + \int_f^g b\sigma_5(x)xdx + \int_g^d b\sigma_6(x)xdx + \sigma_s A_s a_s - \sigma_s' A_s' (d - a_s') + N_u \frac{d}{2} + M_u = 0 \quad (10b)$$

式中: a 为 ECC 开始开裂时的高度; c 为中和轴的高度; e 为 ECC 受压达到 40%峰值应力时的高度; f 为 ECC 受压达到峰值应力时的高度; g 为 ECC 受压下降达到 50%峰值应力时的高度; d 为截面的高度。

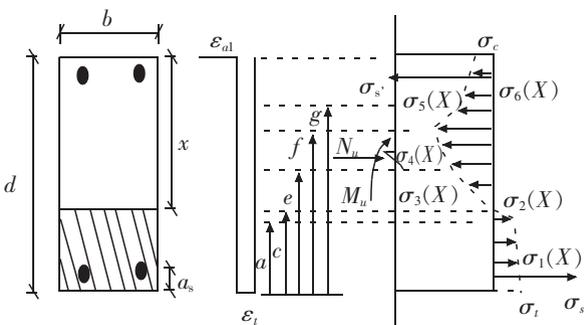


图 3 沿截面高应力-应变分布

Fig.3 Stress-strain distribution along section height

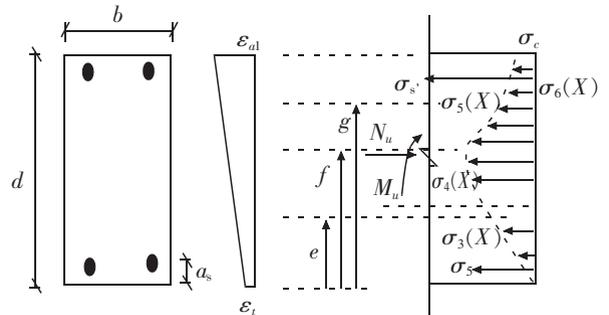


图 4 全截面受压时沿截面高应力-应变分布

Fig.4 Stress-strain distribution along section height with full section compression

图 4 为全截面受压时沿截面高应力-应变分布。对截面进行受力分析,在轴力 N 和弯矩 M 的共同作用下,由力平衡和力矩平衡可得以下方程:

$$\int_0^e b\sigma_3(x)dx + \int_e^f b\sigma_4(x)dx + \int_f^g b\sigma_5(x)dx + \int_g^d b\sigma_6(x)dx + \sigma_s A_s - \sigma_s' A_s' + N_u = 0 \quad (11a)$$

$$\int_0^e b\sigma_3(x)xdx + \int_e^f b\sigma_4(x)xdx + \int_f^g b\sigma_5(x)xdx + \int_g^d b\sigma_6(x)xdx + \sigma_s A_s a_s - \sigma_s' A_s' (d - a_s') + N_u \frac{d}{2} + M_u = 0 \quad (11b)$$

式中: e 为 ECC 受压达到 40%峰值应力时的高度; f 为 ECC 受压达到峰值应力时的高度; g 为 ECC 受压下降

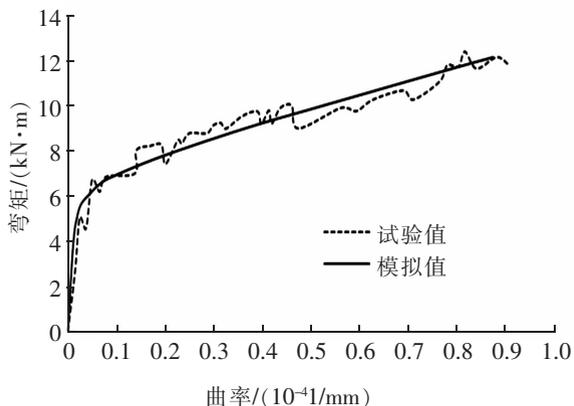
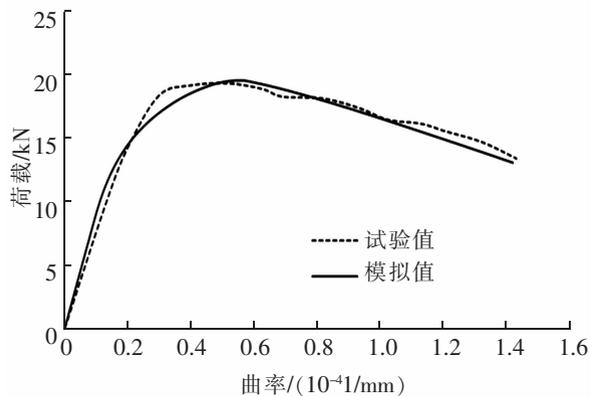


图5 模拟弯矩-曲率曲线

Fig.5 Simulated moment-curvature curve

图6 R/ECC柱 S-4 模拟荷载-变形曲线与试验结果对比
Fig.6 Comparison of load-deformation curves between experimental and simulation results on R/ECC column S-4

达到 50%峰值应力时的高度, d 是截面的高度。

本文对文献[10]的 R/ECC 梁和文献[11]的 R/ECC 柱进行数值模拟,从图 5 和图 6 可以看出模拟结果和试验数值基本吻合。通过模拟上述构件的弯矩-曲率曲线和荷载-曲率曲线可以认为,基于力的平衡方程和材料的本构模型用数值分析方法来分析构件的力学性能是有效的一种方法,具有较好的准确性。

3 参数分析

本文通过上述方法模拟 R/ECC 柱。ECC 材料应用于偏压柱除了提高其耐久性能之外,还能充分发挥材料优越的延性。对 R/ECC 偏心受压构件在不同参数(包括初始偏心距、配筋率和 ECC 的抗压强度)情况下的弯矩-曲率关系进行计算分析。基准构件的材料参数具体数值如下:初裂强度 $\sigma_{ic}=3$ MPa;初裂应变 $\varepsilon_{ic}=0.000 21$;极限抗拉强度 $\sigma_{tm}=4.5$ MPa;极限拉应变 $\varepsilon_{tm}=0.03$;抗压强度 $\sigma_{c0}=40$ MPa;峰值强度对应的应变 $\varepsilon_{c0}=0.004$;极限压应变 $\varepsilon_{cm}=0.018$ 。钢筋屈服强度 $f_y=520$ MPa;屈服应变 $\varepsilon_y=0.002 6$;钢筋的极限强度 $f_{su}=630$ MPa;钢筋的极限拉应变 $\varepsilon_{su}=0.08$ 。基准构件的尺寸为 200 mm×250 mm,长度为 1 200 mm。配置了 4 根直径为 16 mm 的纵向钢筋,总截面积为 803.84 mm²,初始偏心距为 80 mm。

R/ECC 构件在给定的偏心距下,一般是弯矩首先随着曲率的增大而迅速增长,当荷载超过一定值后,受拉钢筋开始屈服,弯矩开始随着曲率的增长而减小,直至构件受压区发生破坏。

3.1 配筋率的影响

图 7 是不同配筋率下的柱正截面弯矩-曲率曲线图,配筋率分别为 0.9%,1.6%,2.5%。在柱截面受拉区初裂前,可以看出 3 种配筋率下的弯矩-曲率曲线基本吻合;开裂之后的趋势也基本一致,都是弯矩随着曲率的增长先增加后减小;但是配筋率更高的柱构件的承载力增加更快。另外 0.9%配筋率的柱构件的极限承载力是 1.6%配筋率的 0.87 倍,是配筋率 2.5%的 0.76 倍,提高构件的配筋率可以增加构件的极限承载力。但是 0.9%配筋率柱构件的极限曲率是 1.6%配筋率的 1.09 倍,是 2.5%配筋率的 1.15 倍,配筋率高的柱构件的变形能力相对较差。

3.2 偏心距的影响

偏心距是另一个影响偏心受压构件的承载力和变形能力的因素。本文分析了 3 种不同的偏心距下的 R/ECC 柱的弯矩-曲率曲线。

图 8 为不同偏心距下柱正截面的弯矩-曲率图,偏心距分别为 40,80 mm 和 120 mm。柱正截面受拉区 ECC 开裂前,3 种偏心距的弯矩-曲率曲线几乎吻合,之后,弯矩都经历了随着曲率增长先增后减的过程。从表 1 中列出的各强度指标值中可以看出,偏心距为 40 mm 的柱构件的抗压承载力最大,而抗弯承载力最小;偏心距为 120 mm 的柱构件的抗压承载力最小,其抗弯承载力最大。

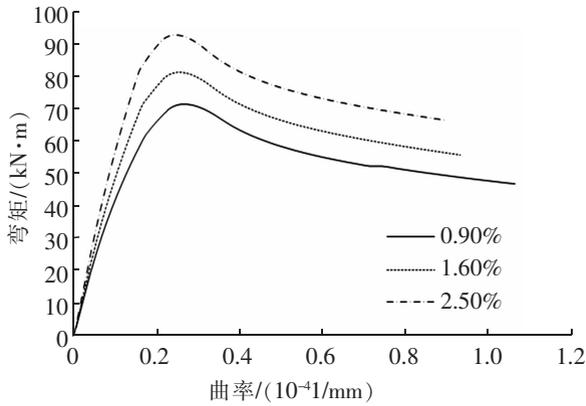


图7 不同配筋率下的弯矩-曲率曲线

Fig.7 Moment-curvature curves of section with different ratios of steel

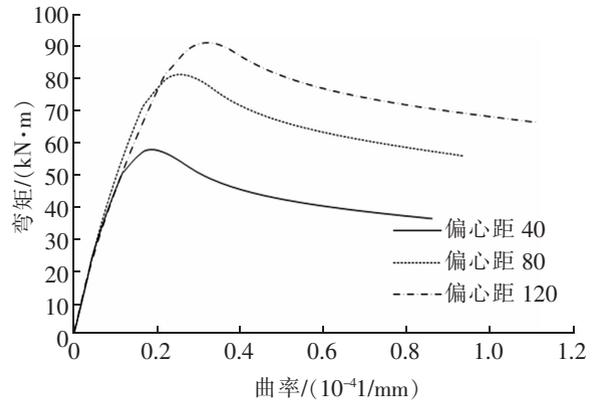


图8 不同偏心距下的弯矩-曲率曲线

Fig.8 Moment-curvature of section with different eccentricity

表1 不同偏心率下各试件强度指标值汇总

Tab.1 Summary of strength index for specimens with various eccentricities

偏心距/mm	基体类型	抗压承载力 N_u /kN	抗弯承载力 M_u /(kN·m)
$e_0=40$	ECC	1 443.8	57.75
$e_0=80$	ECC	1 016.2	81.31
$e_0=120$	ECC	760.8	91.32

3.3 ECC 抗压强度的影响

图9为ECC不同抗压强度的弯矩-曲率曲线图,ECC的抗压强度分别为30,40,50 MPa。3种ECC抗压强度下的弯矩-曲率曲线趋势基本一致,ECC抗压强度为50 MPa的柱构件的承载力增长更快;ECC抗压强度为30 MPa的柱构件的极限承载力是ECC抗压强度为40 MPa的0.80倍,是ECC抗压强度为50 MPa的0.69倍;另外ECC抗压强度为30 MPa的柱构件的极限曲率是ECC抗压强度为40 MPa的0.96倍,是ECC抗压强度为50 MPa的0.90倍。随着ECC抗压强度的提高,不仅承载力得到提高,变形能力相对也得到了提高。

3.4 R/ECC 受压构件正截面承载力 N_u-M_u 相关曲线

试验研究表明,在偏心距较小时,混凝土偏心受压构件随着轴向压力的增加其截面受弯承载力反而减小;但在偏心距较大时,轴向压力的增加反而使得构件正截面受弯承载力提高,当发生界限破坏时,正截面受弯承载力达到最大值^[12]。也就是说偏心受压构件正截面受压承载力 N_u 与受弯承载力 M_u 存在一定的关系。

从图10中可以看出,轴力 N_u 和弯矩 M_u 不是一一对应的关系,当轴力 N_u 确定时有唯一的弯矩 M_u 与之对应,而当给定 M_u 时, N_u 最少有1个也可能有2个;由于材料的特性,R/ECC柱正截面承载力 N_u-M_u 相关曲线的变化趋势和RC柱基本一致;但是在相同的条件下,R/ECC柱的正截面相关曲线完全包裹住了RC柱,说明在偏心受压荷载下,R/ECC柱能承受更复杂的荷载。其次,当柱截面只受到轴力时,ECC的抗压强度和混凝土的相同,RC柱和R/ECC柱正截面受压承载力相差很小;因为此时柱截面全部处于受压状态。但是当柱截面不但受到轴力还受到弯矩时,R/ECC柱的正截面受压承载力和受弯承载力就明显大于RC柱;因此对于工程实际中处于复杂受力状态下的承压柱,R/ECC柱相对于RC柱表现出来的力学性能更加优越,R/ECC柱相对于RC柱更加偏于安全可靠。

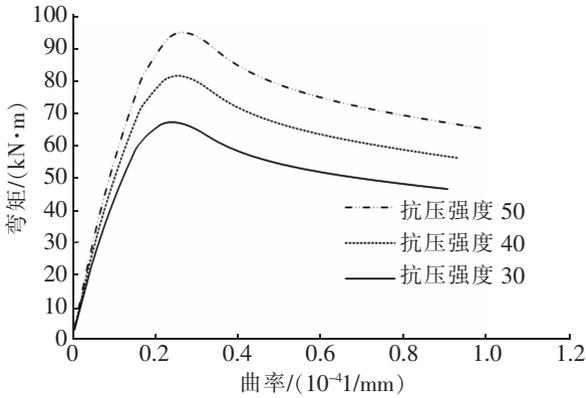


图9 不同抗压强度下的弯矩-曲率曲线

Fig.9 Moment-curvature of section with different compressive strength

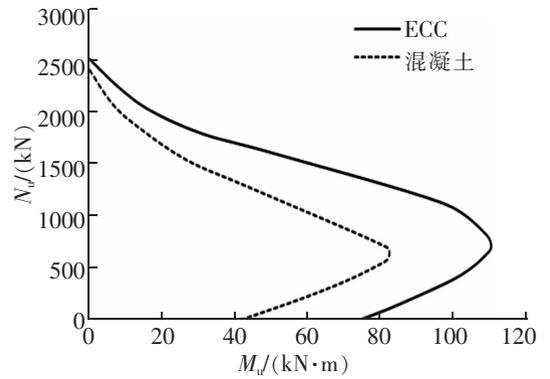
图10 RC柱与R/ECC柱承载力 N_u - M_u 相关曲线对比

Fig.10 Comparison of load carrying capacity correlation curve between RC column and R/ECC column

4 结论

- 1) 提高 R/ECC 柱纵向配筋率,可以提高其承载力,但是会降低其变形能力,延性较差。
- 2) 对于确定的 R/ECC 柱,偏心距越大,其抗弯承载力越大,但是抗压承载力却越小。
- 3) 提高 ECC 抗压强度,不仅可以提高 R/ECC 柱承载力,而且其变形能力也可以得到一定的提高。
- 4) 在其他条件都相同的情况下,R/ECC 柱正截面承载力 N_u - M_u 相关曲线完全包裹住了 RC 柱,可以认为对于处于不同压弯内力组合下的受压柱,R/ECC 柱相对于 RC 柱适用范围更广。

参考文献:

- [1] LI Z J. Advanced concrete technology[M]. Jersey, America: John Wiley & Sons Incorporated, 2011.
- [2] LI VICTOR C. 高延性纤维增强水泥基复合材料的研究进展及应用[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(4): 531-536.
- [3] ZHOU J J, PAN J L, LEUNG C K Y, et al. Experimental study on mechanical behavior of pseudo-ductile cementitious composites and normal concrete under biaxial compression[J]. Science China, 2013, 56(4): 963-969.
- [4] FISCHER G. Influence of matrix ductility on tension-stiffening behavior of steel reinforced engineered cementitious composites (ECC)[J]. Aci Structural Journal, 2002, 99(1): 104-111.
- [5] ZHOU J J, PAN J L, LEUNG C K Y. Mechanical behavior of fiber reinforced engineered cementitious composites in uniaxial compression[J]. Journal of Material in Civil Engineering, 2014, 27(1): 04014111.
- [6] HOGNESTAD E, HANSON N W, MCHENRY D. Concrete stress distribution in ultimate strength design[J]. ACI Journal, 1995, 52(12): 455-479.
- [7] MAALEJ M, LI V C. Flexural/tensile-strength ratio in engineered cementitious composites[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1994, 6(4): 513-528.
- [8] YUAN F, PAN J, WU Y. Numerical study on flexural behaviors of steel reinforced engineered cementitious composite (ECC) and ECC/concrete composite beams[J]. Science China Technological Sciences, 2014, 3(57): 637-645.
- [9] COMMITTEE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. CEB-FIB model code 1990: design code[S]. Thomas Telford, Lausanne, Switzerland, 1993.
- [10] 袁方. 钢筋增强 ECC/混凝土组合框架结构抗震性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2014.
- [11] FISCHER G, LI V C. Effect of matrix ductility on deformation behavior of steel reinforced ECC flexural members under reversed cyclic loading condition[J]. ACI Structural Journal, 2002, 99(6): 781-790.
- [12] 东南大学, 同济大学, 天津大学. 混凝土结构设计原理[M]. 4版. 中国建筑工业出版社, 2008.

Mechanical Behavior of Steel Reinforced ECC Columns under Eccentric Compression

Chen Mengcheng, Zhou Fengliu, Yuan Fang

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: To further study the compatible working performance between steel bar and engineering cementitious composite (ECC), the eccentric compression behavior of steel bar reinforced ECC columns is systematically analyzed in this paper. Firstly, the constitutive model of ECC material is simplified to analyze the mechanical properties of the member under eccentric compression through numerical integration. The research results show that the theoretical and the measured results agree well, which verifies the reliability of the proposed method. Then, based on this method, the effects of steel reinforcement ratios, load eccentricities, and ECC compression strength on the mechanical properties of columns under eccentric compression were analyzed. Finally, the load carrying capacity ($Nu-Mu$) relation curve of R/ECC columns was compared with that of the steel reinforced concrete (RC) columns, which shows that the $Nu-Mu$ curve of R/ECC column is fuller than that of RC column, indicating higher safety performance of R/ECC columns.

Key words: steel-reinforced ECC columns; eccentric compression; moment-curvature; numerical integration