

钢筋增强 ECC 柱偏心受压力学性能有限元模拟

袁 方,陈梦成

(华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013)

摘 要 目的 将 ECC 替代混凝土用于建筑结构以解决因混凝土脆性导致的开裂和耐久性问题. 方法 提出 ECC 材料简化拉、压应力-应变关系模型,并通过有限元模拟方法对钢筋增强 ECC(R/ECC)柱偏心受压力学性能进行评估.在此基础上,以偏心距为参数,分析了各偏心率下 R/ECC 偏心受压构件的荷载-变形曲线,得出了承载力 N_u-M_u 关系曲线. 结果 笔者提出的模型能够准确地模拟 R/ECC 构件的承载力及变形行为.在各偏心率下,R/ECC 柱的抗弯承载力均要显著大于 RC 柱,通过应变云图分析可以得知,R/ECC 柱受拉侧 ECC 能够始终提供稳定的抗拉承载力,使得 R/ECC 柱的极限弯矩要大于 RC 柱. 结论 相同条件下,R/ECC 柱偏心受压承载力和延性均要明显优于 RC 构件.

关键词 高延性纤维增强水泥基复合材料;偏心受压;承载力;延性;有限元

中图分类号 TU398

文献标志码 A

Finite Element Simulation on Steel Reinforced ECC Columns under Eccentric Compressive Loading

YUAN Fang, CHEN Mengcheng

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

Abstract: Substitution of concrete with ECC can avoid the cracking and durability problems associated with brittleness of concrete. In this paper, the simplified stress-strain model of ECC under uniaxial tension and compression is proposed and the mechanical behavior of steel reinforced ECC (R/ECC) columns under eccentric compression is evaluated by finite element method. The load-deformation curves of R/ECC columns with various eccentricities are calculated and the load carrying capacity correlation curves (N_u-M_u) are obtained. It is indicated that the load carrying and deformation responses can be accurately calculated by the proposed model. The flexural strength of R/ECC column is evidently higher than that of RC column. It is observed from the strain contour that the tensile load can be continued provided by ECC during the loading process, making the higher flexural loading capacity of R/ECC column. The simulation results indicate that the R/ECC column shows higher load carrying capacity and ductility than those of RC column under eccentric

收稿日期:2016-12-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51608199);江西省优势科技创新团队项目(20152BCB24006);江西省自然科学基金项目(20161BAB216140);江西省教育厅青年项目(GJJ150519)

作者简介:袁方(1986—),男,博士,主要从事新型建筑材料及其在结构抗震方面研究.

compressive loading.

Key words: engineered cementitious composite (ECC); eccentric compression; load carrying capacity; ductility; finite element method

混凝土材料具有取材便利、抗压强度高及与钢筋粘结性能好等优点,是当今建筑工程领域应用最为广泛的材料之一^[1].然而,混凝土在拉伸荷载作用下,一旦开裂承载力便急剧下降且裂缝宽度迅速增加,而钢筋长期暴露在腐蚀环境中容易引起混凝土膨胀开裂、混凝土保护层脱落和结构承载力下降等问题,严重影响建筑结构的安全性和耐久性^[2].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^[3-5].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),但两者的变形行为存在很大的差异.在单轴拉伸荷载作用下,普通混凝土表现出明显的脆性破坏特征,极限拉应变仅为0.000 15;而ECC材料在初裂后承载力能够继续增加,并通过多裂缝开展实现应变硬化行为.每一条细裂缝开展到约60 μm 时便保持稳定,通过纤维-基体界面粘结作用将应力传递给基体,促使新裂缝的不断出现,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 ^[6].在单轴压缩荷载作用下,ECC峰值压应力对应的应变约为0.004,约为混凝土的两倍^[7].因此,将ECC替代混凝土用于工程结构中,能够显著提高构件的延性和耐久性,是当前高性能建筑材料的一个重要研究领域.以往的研究结果表明,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^[8].国内外学者对R/ECC构件的力学性能和抗震性能进行了大量试

验研究,包括梁^[9-10]、柱^[11]、梁-柱节点^[12]、填充墙^[13]、框架^[14]及预应力桥墩^[15]等.国内的徐世烺团队对超高韧性纤维增强水泥基材料(UHTCC)也进行了大量的试验研究^[16].

目前为止,R/ECC构件大量研究都集中在试验研究,对于R/ECC构件有限元模拟方面的研究工作开展较少,特别是对于R/ECC柱在偏心受压荷载作用下力学性能的模拟,还未出现相关研究工作.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.基于此,笔者通过有限元模拟方法对R/ECC柱偏心受压力学性能进行研究.在已有试验数据的基础上提出ECC材料简化拉、压应力-应变关系模型,对R/ECC柱偏心受压工作机理进行探讨,并与钢筋混凝土(RC)偏心受压构件进行对比.以偏心率为参数,分析各偏心率下R/ECC偏心受压构件的荷载-变形行为,从而得出R/ECC柱承载力 N_0-M_0 关系曲线.最后,以ECC材性参数和配筋率为影响因素,对R/ECC柱正截面承载力 N_0-M_0 相关曲线进行了参数分析.

1 有限元模型建立

1.1 材料本构模型

笔者对ECC材料进行单轴拉伸和单轴压缩试验,单轴拉伸试验材料为薄板试件,尺寸为350 mm×50 mm×15 mm.在加载开始前,用铝板粘贴在试件两端,试验过程中通过MTS夹头夹住试件两端的铝板进行加载,以防止发生局部压碎破坏.单轴压缩试件为直径100 mm、高200 mm的圆柱.试验所得的ECC单轴拉、压应力-应变曲线如图1所示.

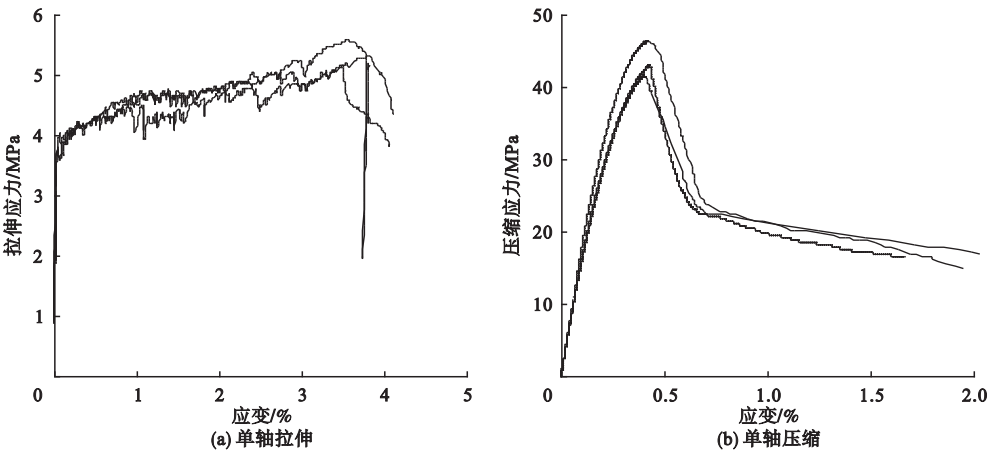


图1 试验所得 ECC 材料应力 - 应变曲线

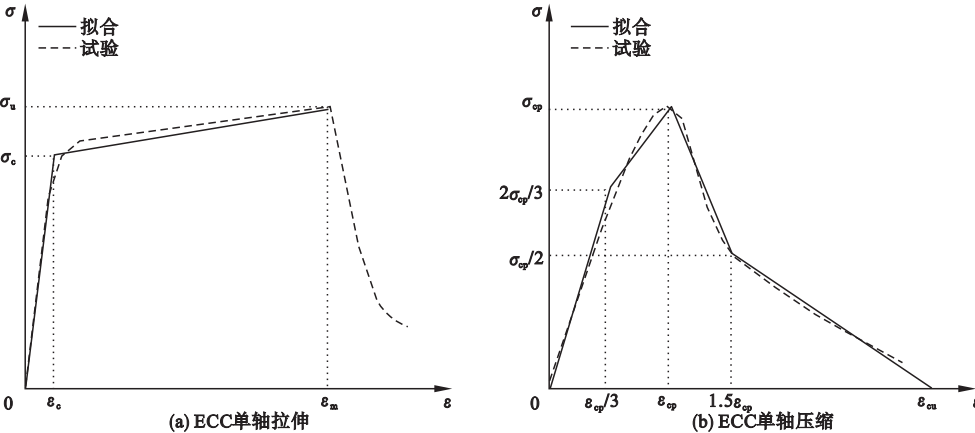
Fig. 1 Test results of stress-strain curves of ECC

从图 1(a)中可以看出,ECC 在单轴拉伸荷载作用下的极限应变能够超过 3%,峰值应力能够达到 5MPa 以上,表现出了优越的延性性能.在单轴压缩荷载作用下,应力首先随着应变迅速增长,当应变达到约 0.004 时,ECC 到达峰值应力,随后应力迅速下降至峰值应力的一半左右,之后应力随着应变的增加缓慢下降.从图 1(b)中可以看出,ECC 弹性模量比混凝土小,而峰值应力对应的应变约为混凝土的 2 倍.

采用有限元软件 ATENA 对 R/ECC 柱偏心受压力学性能进行模拟.其中,采用 8 节点正方体单元对混凝土及 ECC 进行模拟,采用桁架单元对钢筋进行模拟,单元尺寸接近于粗骨料最大粒径,设置为 20 mm.对于 ECC 材料,在试验所得典型单轴拉、压应

力 - 应变曲线的基础上,通过简化模型来表征其本构关系(见图 2).

为了更好地模拟 RC 柱及 R/ECC 柱的偏心受压力学性能,笔者对材料本构模型进行了如下假定:①ECC 单轴拉压应力 - 应变曲线分别通过双线性模型(见图 2(a))和多折线模型(见图 2(b))进行表征,当 ECC 超过极限拉应变时认为 ECC 已不具备抗拉承载能力;②采用双线性弹塑性强化模型来表征钢筋应力 - 应变关系(见图 2(c));③对于混凝土,应力 - 应变曲线上升段采用 Hognestad 等^[17]提出的模型,下降段则采用线性模型进行模拟(见图 2(d));④钢筋与混凝土粘结滑移关系采用能够反映其实际应力变化情况的“CEB-FIB Model code 1990”模型进行模拟^[18].



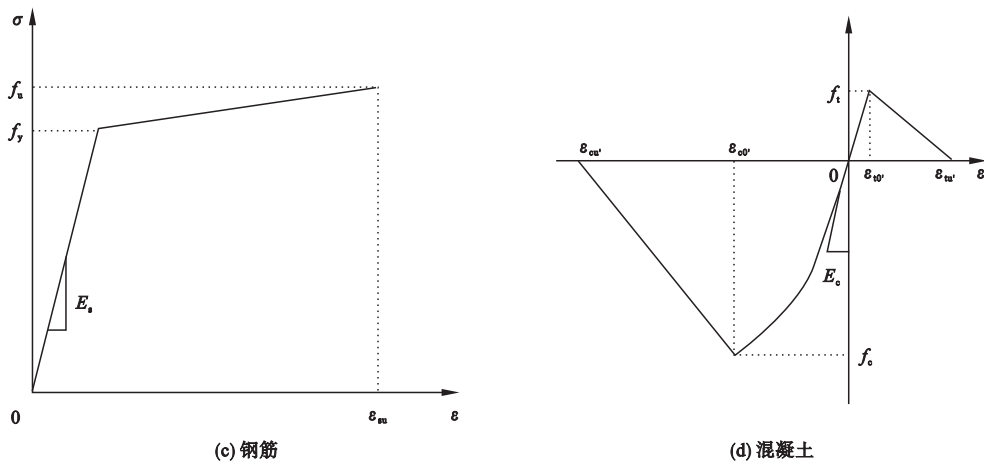


图2 材料应力-应变关系

Fig. 2 Stress-strain relationships of materials

1.2 分析模型建立

笔者选取了一个牛腿状柱进行分析,试件的配筋情况、几何尺寸及边界条件示意图如图3所示.试件中部截面尺寸为250 mm×250 mm,配置了4根直径为16 mm的纵筋,箍筋直径和间距分别为10 mm和100 mm;试件端部截面尺寸为250 mm×400 mm,为了防止集中荷载作用引起的端部破坏,在试件端部增加了2根直径为16 mm的纵筋,且箍筋间距减小至50 mm.在试件两端设置刚度无限大的加载板,在加载开始前,首先在下端加载板底面中线施加约束,限制X、Y、Z三个方向的位移;然后对上端加载板中心位置施加集中荷载.文中偏心距 e 定义为试件中心线距加载点的距离,通过加载板位置的变化改变偏心距的大小,如图3所示.选用位移加载方案进行加载,迭代方法选用精度较高的“Newton-Raphson”法,计算过程中的残余应力和位移的收敛容差均设置为0.005.

2 有限元模型验证

由于以往研究中暂未出现R/ECC柱偏心受压力学性能相关的试验研究工作,因此,笔者选取文献[19]中R/ECC梁及文献[11]中的R/ECC柱S-4为研究对象,对其荷

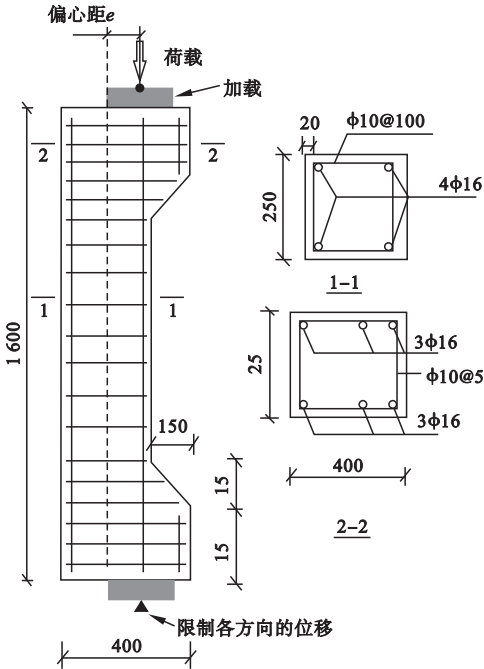


图3 试件配筋及边界条件示意图

Fig. 3 Reinforcement details and boundary conditions of specimens

载-变形行为进行模拟,以验证笔者所提出的ECC简化本构模型及有限元模型的准确性. R/ECC梁截面尺寸为200 mm×300 mm,梁底和梁顶分别配置了2根直径为25 mm和20 mm的纵筋,弯剪段箍筋直径和间距分别为10 mm和100 mm,纯弯段未配置箍筋,构件最终因ECC压碎而发生弯曲破

坏。S-4 柱高为 500 mm, 截面尺寸为 100 mm×100 mm, 构件配置了 4 根直径为 9.5 mm 的纵筋以及直径为 3.5 mm、间距为 25 mm 的箍筋, 柱顶施加了 80 kN 的轴向荷载, 对应的轴压比为 0.1。各试件通过有限元模拟所得的荷载-变形曲线与试验所测得的荷载-变形曲线对比结果如图 4 所示。从图中可以看出, 模拟所得的荷载-变形曲线变化趋势与试验结果较为一致。对于 R/ECC 梁, 模拟所得的屈服荷载和极限荷载分别比

试验结果大 7.0% 和 8.8%; 模拟结果所得的极限位移 (155.0 mm) 也仅比试验值 (145.8 mm) 大 6.3%。对于 R/ECC 柱, 除了初始刚度稍微有点差距外, 屈服荷载和峰值荷载非常接近, 模拟所得的峰值荷载值 (19.57 kN) 仅比试验值 (19.37 kN) 大 1%。因此, 笔者所提出的 ECC 简化本构模型及有限元模型能够较为准确地反映 R/ECC 构件的荷载-变形行为, 可以用于文中 R/ECC 柱偏心受压力学性能的模拟研究。

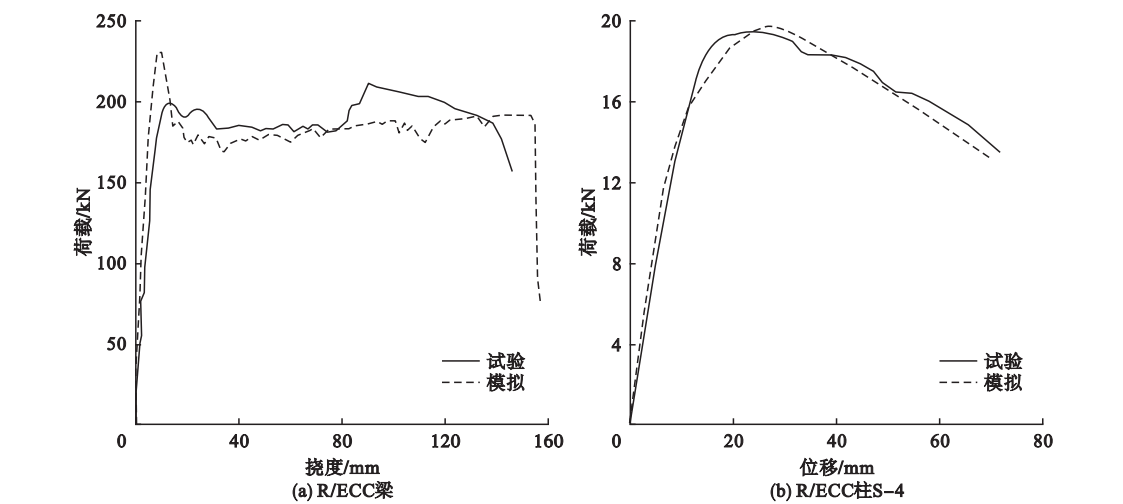


图 4 有限元模拟荷载-变形曲线与试验结果对比

Fig. 4 Comparison of load-deformation curves between experimental and simulation results

3 模拟结果与分析

3.1 荷载-变形行为分析

采用有限元建模对 1.2 节所介绍的模型

进行计算, 偏心距取为 180 mm, 相应的偏心率为 0.72。混凝土和 ECC 的材性参数如表 1 所示, 钢筋的弹性模量、屈服强度和极限强度分别取为 200 GPa、460 MPa 和 610 MPa。

表 1 混凝土与 ECC 材性参数

Table 1 Material parameters of concrete and ECC

混凝土					ECC				
抗压强度 f_c/MPa	峰值荷载对应的压应变 ε_{c0}'	抗拉强度 f_t/MPa	峰值荷载下对应的拉应变 σ_{t0}'	极限应变 $\varepsilon_{tu}'/\varepsilon_{cu}'$	初裂应变 ε_{tc}	初裂应力 σ_{tc}/MPa	峰值荷载对应的应变 $\varepsilon_{tp}/\varepsilon_{cp}$	峰值应力 σ_{tp}/σ_{cp}	极限应变 $\varepsilon_{tu}/\varepsilon_{cu}$
-30	-0.002	3.5	0.000 15	0.001 2/-0.006	0.000 21	3	0.03/-0.004	4.5/-30	0.045/-0.012

图 5 为 RC 柱与 R/ECC 柱弯矩-挠度关系曲线。其中挠度取值为柱高一半截面的侧向变形, 弯矩取值包含两个部分: 一是初始偏心距引起的一阶弯矩; 另外还包含由纵向

弯曲引起的二阶弯矩:

$$M = Ne_0 + Nf. \tag{1}$$

式中: N 为轴向压力; e_0 为初始偏心距; f 为附加挠度。

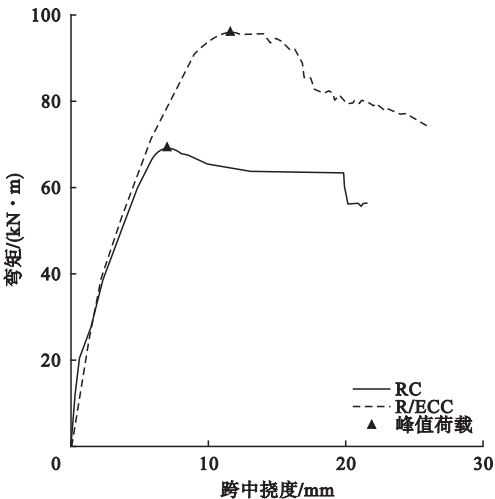


图5 偏心受压下 RC 柱与 R/ECC 柱弯矩 - 跨中挠度曲线对比

Fig. 5 Comparison of moment-deflection response between RC column and R/ECC column under eccentric compressive loading

从图5可以看出,RC柱与R/ECC柱荷载-变形曲线的变化趋势较为一致.弯矩首先随着变形的增加迅速增长,当纵向钢筋发生屈服后,曲线的斜率逐渐减小直至达到峰值承载力,之后荷载随着变形的增加缓慢降低,直至构件发生弯曲受压破坏.从图中还可以看出,在构件尺寸和配筋相同的情况下,R/ECC柱的抗弯承载力要明显大于RC柱.R/ECC柱的峰值弯矩为95.68 kN·m,是RC

柱峰值弯矩(69.55 kN·m)的1.38倍.R/ECC柱较RC柱更高的承载力主要归功于ECC材料超高的拉伸延性特征.由于ECC材料的极限拉应变能够达到3%~5%,峰值荷载下ECC仍然处于拉伸应变硬化段,仍能为承载力作出一定的贡献;然而,峰值荷载下混凝土早已开裂,抗拉承载力几乎可以忽略不计.ECC参与抗拉作用相当于增加了柱构件的纵筋配筋率,配筋率越高,则抗弯承载力越高.另外,由于ECC峰值应力对应的应变计极限应变均要大于混凝土,压缩应力-应变曲线包裹的面积更大,因此,R/ECC柱的变形能力和延性也比RC柱要强,如图5所示,R/ECC柱的极限变形较RC柱高出约30%.另外值得一提的是,虽然ECC弹性模量仅为混凝土的1/2~2/5,但RC柱与R/ECC柱的初始刚度却非常接近,这主要是由于ECC拉伸延性使得ECC始终能为R/ECC柱抗弯承载力起贡献作用.笔者以弯矩-变形曲线原点与60%峰值荷载点连线的斜率定义为柱的初始刚度.

3.2 应变云图分析

图6和图7分别为RC柱和R/ECC柱在偏心荷载作用下的整体变形和应变云图,图中构件在各状态下的变形均放大了10倍.

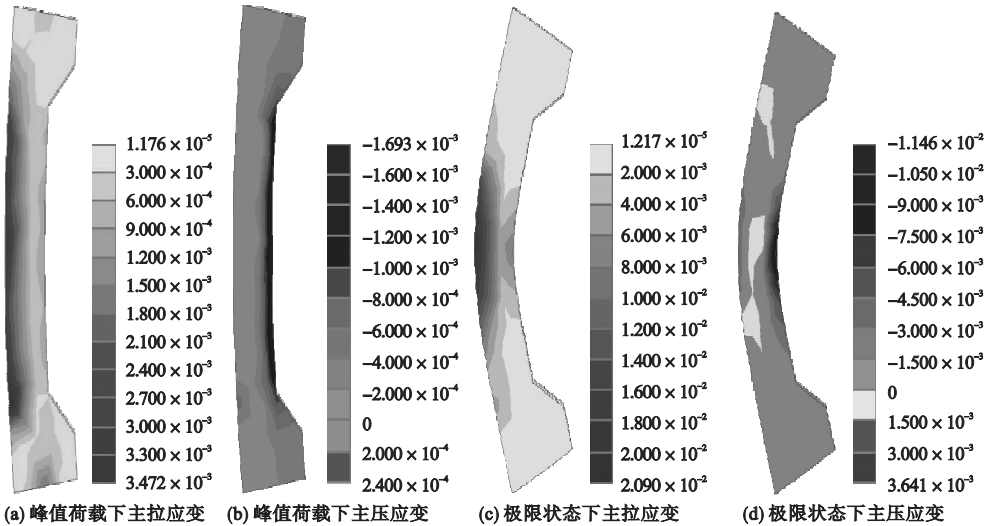


图6 RC柱整体变形及应变云图

Fig. 6 Overall deformations and strain contours of RC columns

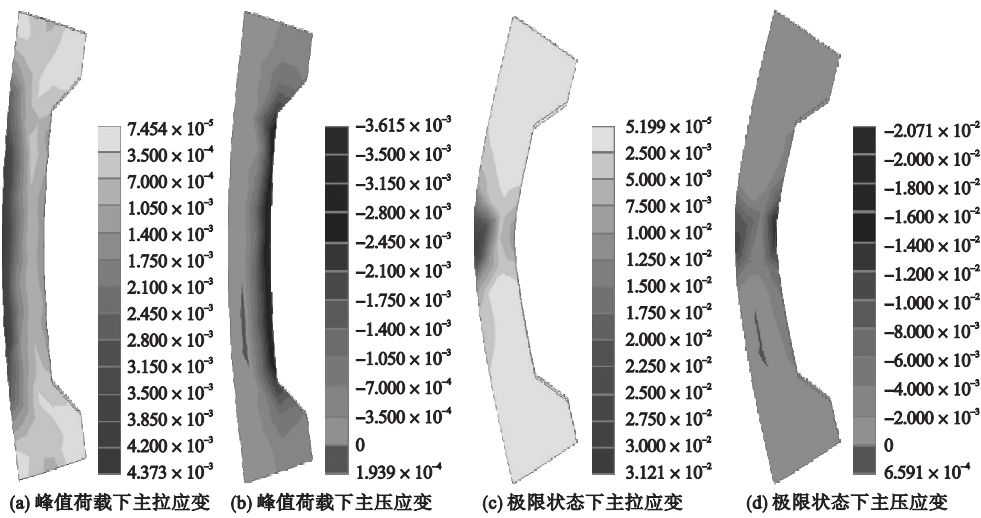


图7 R/ECC柱整体变形及应变云图

Fig. 7 Overall deformations and strain contours of R/ECC columns

由于上加载板加载点的位置与下加载板位移约束位置一致,上下荷载对称,导致构件侧向最大变形处几乎在跨中截面位置。通过图 6(a)与图 7(a)中的应变云图的对比可以发现,峰值荷载下混凝土和 ECC 最大主拉应变分别为 3.472×10^{-3} 和 4.373×10^{-3} ,而混凝土和 ECC 峰值拉应力下对应的应变分别约为 0.000 15 和 0.03,说明峰值荷载下 RC 柱受拉侧已出现裂缝,混凝土的抗拉作用较小;然而,R/ECC 柱受拉侧 ECC 还远未达到应力进入软化段所对应的应变,ECC 仍能为构件提供稳定的抗拉承载力,造成 R/ECC 柱偏压承载力要明显大于 RC 柱。从图 6(b)与图 7(b)中的应变云图的对比可以看出,峰值荷载下混凝土和 ECC 最大主压应变分别为 -1.693×10^{-3} 和 -3.615×10^{-3} ,而混凝土和 ECC 峰值压应力下对应的应变分别约为 -0.002 和 -0.004 ,因此可以得知峰值荷载下混凝土和 ECC 仍然处于应变硬化段,并未达到峰值应力值。由于峰值荷载下 R/ECC 柱中 ECC 最大主压应变是 RC 柱中混凝土最大主压应变的 2 倍多,造成峰值荷载下 R/ECC 柱跨中截面的侧向变形明显大于 RC 柱。

在极限状态下,R/ECC 柱应变云图与

RC 柱也有显著差别。通过图 6(c)与图 7(c)中的应变云图的对比可以发现,极限状态下混凝土和 ECC 最大主拉应变分别为 2.090×10^{-2} 和 3.121×10^{-2} ,此刻混凝土已早就进入软化段,拉伸应力所剩无几,抗拉作用几乎可以忽略不计;而 ECC 的应变略大于其峰值应力对应的应变,说明此刻仅 R/ECC 柱最外侧 ECC 进入拉伸软化段,接近中和轴的 ECC 仍能继续承担拉伸荷载。从图 6(d)与图 7(d)中的应变云图的对比可以看出,极限状态下混凝土和 ECC 最大主压应变分别为 -1.146×10^{-2} 和 -2.071×10^{-2} ,明显大于各自峰值应力对应的应变,混凝土和 ECC 均已进入压缩软化段,说明 RC 柱和 R/ECC 柱均是由于基体被压碎而发生弯曲受压破坏。由于极限状态下 R/ECC 柱中 ECC 最大主压应变是 RC 柱中混凝土最大主压应变的 1.8 倍,导致极限状态下 R/ECC 柱跨中截面的侧向变形明显大于 RC 柱。

3.3 偏心距的影响

对于偏心受压构件,偏心距的增加对于构件承载力和变形的影响非常显著。对于 RC 柱,偏心距的增加将使得抗压承载力降低,而截面抗弯承载力则将随着偏心距的增加先增大后减小。笔者对 R/ECC 柱在不同

偏心距下的荷载 - 变形曲线进行了分析, 偏心距取值从 45 ~ 315 mm, 每隔 45 mm 取一个值, 对应的偏心率为 0.18 ~ 1.26. 图 8 给出了不同偏心距下 RC 柱与 R/ECC 柱弯

矩 - 跨中挠度曲线对比情况. 图中弯矩值为偏心率产生的一阶弯矩与构件侧向变形引起的附加弯矩之和, 试件各强度指标均列于表 2 中.

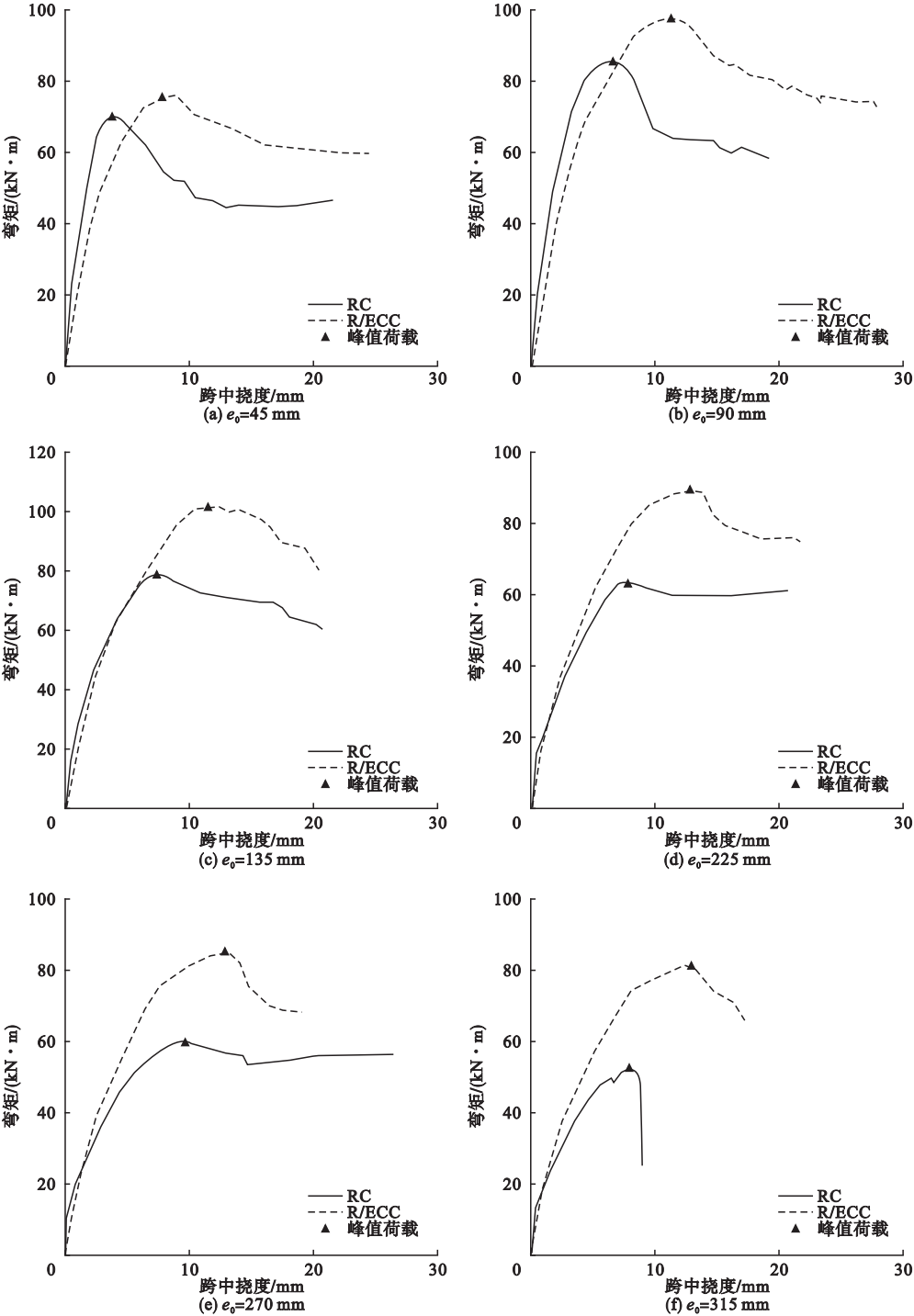


图 8 不同偏心距下 RC 柱与 R/ECC 柱弯矩 - 跨中挠度曲线对比

Fig. 8 Comparison of moment versus mid-span responses between RC columns and R/ECC columns under various eccentricities

表 2 不同偏心率下各试件强度指标值汇总

Table 2 Summary of strength index for specimens with various eccentricities					
偏心距 e_0/mm	基体类型	抗压承载 力 N_u/kN	一阶弯矩 $N_u \cdot e_0/(\text{kN} \cdot \text{m})$	附加弯矩 $N_u \cdot f/(\text{kN} \cdot \text{m})$	抗弯承载 力 $M_u/(\text{kN} \cdot \text{m})$
45	混凝土	1 449.0	65.20	5.32	70.52
	ECC	1 442.0	64.89	11.20	76.09
90	混凝土	885.1	79.66	5.87	85.53
	ECC	962.7	86.64	10.82	97.46
135	混凝土	555.2	74.95	4.07	79.02
	ECC	694.6	93.77	7.96	101.73
180	混凝土	372.1	66.98	2.58	69.56
	ECC	500.0	90.00	5.68	95.68
225	混凝土	273.0	61.43	2.09	63.52
	ECC	375.9	84.58	4.77	89.35
270	混凝土	213.0	57.51	2.04	59.55
	ECC	302.4	81.65	3.87	85.52
315	混凝土	164.8	51.91	1.32	53.23
	ECC	248.6	78.31	3.22	81.53

从图 8 中可以看出,各偏心率下 R/ECC 柱与 RC 柱都经历了弯矩先迅速增加,之后缓慢下降的过程.在各偏心率下,R/ECC 柱的峰值弯矩和对应的侧向挠度均要大于 RC 柱.从表 2 中列出的各强度指标值中可以看出,除了偏心距为 45 mm 的构件之外,R/ECC 柱的抗压承载力均要大于 RC 柱,因而其一阶弯矩($N_u \cdot e_0$)均要大于 RC 柱,加上 R/ECC 柱峰值荷载对应的侧向挠度更大,导致 R/ECC 柱的附加弯矩值($N_u \cdot f$)也要大于 RC 柱,综合起来导致各偏心率下 R/ECC 柱的抗弯承载力均要大于 RC 柱.从表 2 中还可以看出,R/ECC 柱与 RC 柱抗弯承载力的差距与偏心率的大小密切相关,当偏心率越大时,两者差距越显著.分析认为,偏心率越大,构件在峰值荷载下的侧向挠度越大,使得受拉侧钢筋所经历的应变硬化段更长,因而构件的抗弯承载力提升也更为显著.另外值得一提的是,在偏心率较小时,R/ECC 柱初始刚度小于 RC 柱,随着偏心率的增加,两者的差距越来越小;当偏心率较大时,R/ECC 柱刚度反而要大于 RC 柱.当偏心率较小时,构件的刚度取决于基体的弹性模量,由于

ECC 弹性模量比混凝土小,导致 R/ECC 柱的刚度要小于 RC 柱;当偏心率不断增加时,构件的刚度不仅取决于基体的弹性模量,还与其在抗拉侧的贡献息息相关.在大偏心率下,截面中和轴向受压侧偏移,此时 ECC 抗拉的贡献与混凝土相比将会显得格外显著,导致 R/ECC 柱的刚度反而要大于 RC 柱.

在表 2 计算结果的基础上,增加 RC 柱与 R/ECC 柱在轴压和纯弯条件下抗压及抗弯承载力的计算,便可以得到一系列抗压 N_u 与抗弯承载力 M_u 相对应的数值,将其绘于同一个图中,便得到了 RC 柱与 R/ECC 柱承载力 N_u - M_u 相关曲线(见图 9).从图中可以看出,RC 柱与 R/ECC 柱承载力相关曲线的变化趋势一致,即当偏心率很小时, N_u 随着偏心率的增加而降低,而 M_u 却随着偏心率的增加而增加;当偏心率达到某一临界值后, N_u 和 M_u 均随着偏心率的增加而降低.从图 9 中还可以看出,R/ECC 柱的承载力相关曲线始终位于 RC 柱的外侧,曲线包裹的范围更大,说明不管是在轴压、纯弯还是偏心受压荷载作用下,R/ECC 柱抗弯/抗压承载力均要大于 RC 柱;R/ECC 构件所能容许的压弯

内力组合的范围更广、安全可靠性更高. 当 RC 构件通过增加截面尺寸和材料强度来提高设计承载力受到限制时,ECC 替代混凝土是一个可行的方案.

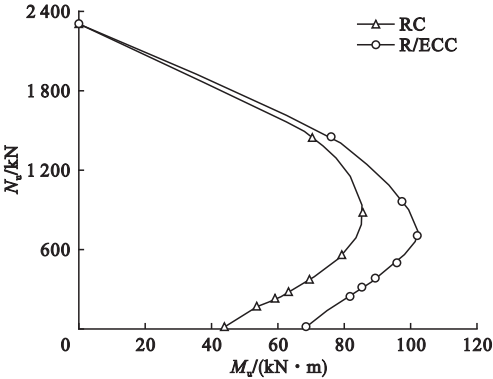


图 9 RC 柱与 R/ECC 柱承载力 N_u - M_u 相关曲线对比

Fig. 9 Comparison of load carrying capacity correlation curve between RC column and R/ECC column

4 N_u - M_u 相关曲线参数分析

基准构件为 1.2 节所介绍的试件,构件尺寸和配筋情况如图 3 所示,材料参数见表 1.

4.1 ECC 抗拉强度的影响

首先考虑 ECC 抗拉强度的影响,保持 ECC 极限抗拉强度不变,抗拉强度变化范围为 4~5.5 MPa. 图 10 为 R/ECC 偏心受压构件不同 ECC 抗拉强度下正截面承载力 N_u - M_u 相关曲线. 从图中可以看出,随着 ECC 抗拉强度的增加,承载力相关曲线不断向外扩张,曲线包括的面积增大,说明 ECC 抗拉强度的提升对于构件承载力是有利的. 由于 ECC 材料的极限拉应变很大,一般情况下, R/ECC 柱峰值荷载下 ECC 仍处于拉伸硬化段,仍能承受一部分拉伸荷载. 与 RC 柱相比,ECC 参与受拉相当于提高了构件的配筋率,因而承载力会不断提升. 然而,ECC 材料的抗拉强度只有 5 MPa 左右,因而随着 ECC 抗拉强度的增加,R/ECC 柱承载力提升的幅度并不是很明显.

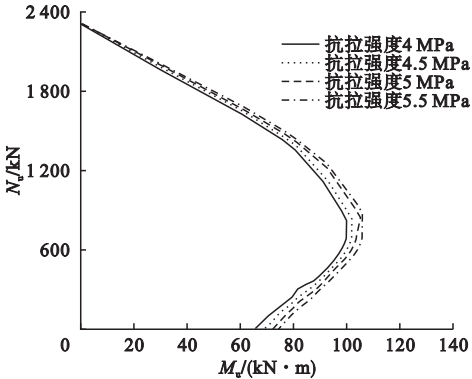


图 10 ECC 抗拉强度对 R/ECC 柱正截面承载力 N_u - M_u 相关曲线的影响

Fig. 10 Effect of ECC tensile strength on load carrying capacity correlation response of R/ECC column

4.2 ECC 极限拉应变的影响

其次考虑的因素为 ECC 极限拉应变,极限拉应变变化范围为 3%~6%,ECC 拉伸硬化段的斜率保持不变. 不同 ECC 极限拉应变下 R/ECC 柱正截面承载力 N_u - M_u 相关曲线如图 11 所示. 从图中可以看出,随着 ECC 极限拉应变的增加,R/ECC 柱承载力相关曲线几乎保持不变. 由于 R/ECC 柱在峰值荷载下 ECC 仍处于拉伸硬化段,ECC 参与受拉的贡献并不会因为极限拉应变的增加而发生变化,因此 R/ECC 柱在偏心受压下的承载力也不会发生变化.

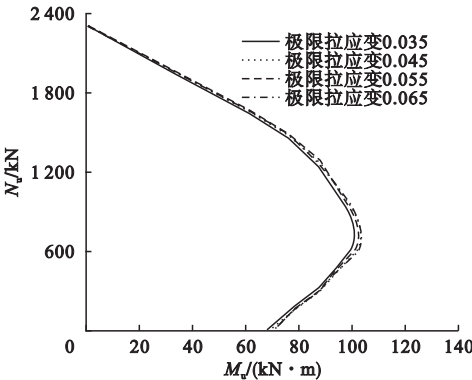


图 11 ECC 极限拉应变对 R/ECC 柱正截面承载力 N_u - M_u 相关曲线的影响

Fig. 11 Effect of ECC ultimate tensile strain on load carrying capacity correlation response of R/ECC column

4.3 ECC 抗压强度的影响

ECC 抗压强度的变化范围为 20 ~ 50 MPa. 图 12 为不同抗压强度下 R/ECC 柱承载力相关曲线的计算结果. 从图中不难看出, ECC 抗压强度对 R/ECC 柱承载力相关曲线的影响非常显著. 随着 ECC 抗压强度的提升,承载力相关曲线大幅度向外扩展,曲线包裹的面积不断增大. 分析认为,随着基体抗压强度的提升,截面中和轴的位置会向受压侧转移,导致 ECC 合力作用点与钢筋之间的距离增加,从而增加了截面的抗弯承载力.

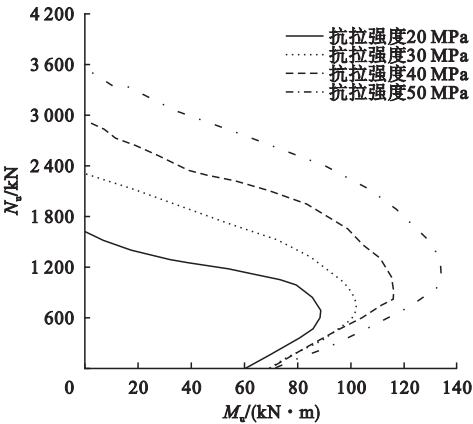


图 12 ECC 抗压强度对 R/ECC 柱正截面承载力 N_u - M_u 相关曲线的影响

Fig. 12 Effect of ECC compressive strength on load carrying capacity correlation response of R/ECC column

4.4 纵筋配筋率的影响

图 13 为纵筋配筋率对 R/ECC 柱承载力相关曲线的影响. 选取了 0.72%、1.29% 和 2.01% 三个配筋率进行分析,分别对应于配置 4 根直径为 12 mm、16 mm 和 20 mm 的纵向钢筋. 从图 13 中可以看出,随着配筋率的增加,承载力相关曲线整体向外转移,承载力不断提高,表明随着配筋率的提高, R/ECC 偏心受压构件正截面在纯弯、轴压和压弯组合受力状态下的承载能力均得到了大幅提升. 不难理解,随着配筋率的增加,纵筋对截面弯矩的贡献也会更大.

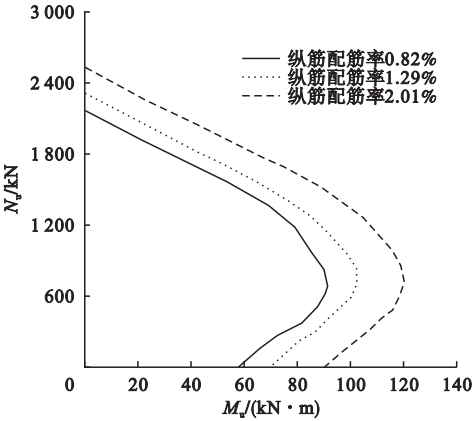


图 13 纵筋配筋率对 R/ECC 柱正截面承载力 N_u - M_u 相关曲线的影响

Fig. 13 Effect of longitudinal reinforcement ratio on load carrying capacity correlation response of R/ECC column

5 结 论

- (1) 通过与试验所得的 R/ECC 梁和 R/ECC 柱荷载 - 变形行为的对比可以得知,笔者所提出的 ECC 简化本构模型及有限元模型能够较为准确地反映 R/ECC 构件的荷载 - 变形行为.
- (2) 在各偏心率下, R/ECC 柱的抗弯承载力均要显著大于 RC 柱,通过应变云图分析可以得知, R/ECC 柱受拉侧 ECC 能够始终提供稳定的抗拉承载力,使得 R/ECC 柱的极限弯矩要大于 RC 柱.
- (3) 在偏心率较小时, R/ECC 柱的刚度小于 RC 柱,随着偏心率的增加,两者的差距越来越小,而当偏心率较大时, R/ECC 柱刚度反而要大于 RC 柱.
- (4) R/ECC 柱的承载力相关曲线始终位移 RC 柱的外侧,曲线包裹的范围更大,说明不管是在轴压、纯弯还是偏心受压荷载作用下, R/ECC 柱抗弯/抗压承载力均要大于 RC 柱.
- (5) 通过 R/ECC 柱正截面承载力关系曲线的参数分析可以得知, ECC 抗拉强度会对承载力相关曲线产生一定的影响, ECC 极限拉应变对承载力的影响微乎其微,而 ECC

抗压强度和纵筋配筋率的提升则会对承载力相关曲线的包裹面积显著增大。

参考文献

- [1] LI Z J. Advanced concrete technology[M]. America: John Wiley & Sons Incorporated, 2011.
- [2] 谢力, 韩英俊, 陈梦成. 湿热环境下混凝土受酸雨腐蚀的试验研究[J]. 华东交通大学学报, 2014, 31(6): 103–107.
(XIE Li, HAN Yingjun, CHEN Mengcheng. Experimental study on acid corrosion of concrete in moist heat environment[J]. Journal of east China jiaotong university, 2014, 31(6): 103–107.)
- [3] KIM Y Y, FISCHER G, LI V C. Performance of bridge deck link slabs designed with ductile ECC[J]. ACI structural journal, 2004, 101(6): 792–801.
- [4] LEPECH M D, LI V C. Application of ECC for bridge deck link slabs[J]. Materials and structures, 2009, 42(9): 1185–1195.
- [5] LEPECH M D, LI V C. Sustainable pavement overlays using engineered cementitious composites[J]. International journal of pavement research and technology, 2010, 3(5): 241–250.
- [6] LI V 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.
(LI V C. Progress and application of engineered cementitious composites[J]. Journal of the Chinese ceramic society, 2007, 35(4): 531–536.)
- [7] 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.
- [8] FISCHER G, LI V C. Influence of matrix ductility on tension-stiffening behavior of steel reinforced engineered cementitious composites[J]. ACI structural journal, 2002, 99(1): 104–111.
- [9] 蔡景明, 潘金龙, 袁方. 钢筋增强 ECC 受弯性能的试验与数值研究[J]. 东南大学学报, 2014, 30(3): 330–335.
(CAI Jingming, PAN Jinlong, YUAN Fang. Experimental and numerical study on flexural behaviors of steel reinforced engineered cementitious composite beams[J]. Journal of southeast university, 2014, 30(3): 330–335.)
- [10] CANBOLAT B A, PARRA-MONTESINOS G J, Wight J K. Experimental study on the seismic behavior of high-performance fiber reinforced cement composite coupling beams[J]. ACI structural journal, 2005, 102(1): 159–166.
- [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] PARRA-MONTESINOS G J, WIGHT J K. Seismic response of exterior RC column-to-steel beam connections[J]. Journal of structural engineering, 2000, 126(10): 1113–1121.
- [13] KESNER K E, BILLINGTON S L. Investigation of infill panels made from engineered cementitious composites for seismic strengthening and retrofit[J]. Journal of structural engineering, 2005, 131(11): 1712–1720.
- [14] FISCHER G, LI V C. Intrinsic response control of moment-resisting frames utilizing advanced composite materials and structural elements[J]. ACI structural journal, 2003, 100(2): 166–176.
- [15] BILLINGTON S L, YOON J K. Cyclic response of unbonded posttensioned precast columns with ductile fiber-reinforced concrete[J]. Journal of bridge engineering, 2004, 9(4): 353–363.
- [16] 徐世烺, 张秀芳. 钢筋增强超高韧性水泥基复合材料 RUHTCC 受弯梁的计算理论与试验研究[J]. 中国科学 E 辑(技术科学), 2009, 39(5): 878–896.
(XU Shilang, ZHANG Xiufang. Theoretical and experimental study on reinforced ultra-high toughness cementitious composite beams[J]. Science China(technological science), 2009, 39(5): 878–896.)
- [17] HOGNESTAD E, HANSON N W, MCHENRY D. Concrete stress distribution in ultimate strength design[J]. ACI journal, 1995, 52(12): 455–479.
- [18] Committee Euro-International Du Beton. CEB-FIB model code 1990: design code[S]. Lausanne: Thomas Telford, 1993.
- [19] 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.
(YUAN Fang. Seismic behaviors of steel reinforced ECC/reinforced concrete composite frame structures[D]. Nanjing: Southeast University, 2014.)