

文章编号:1673-2049(2019)01-0093-08

# ECC/RC 空心楼盖板柱节点抗冲切性能

党隆基<sup>1</sup>, 梁书亭<sup>1</sup>, 庞 瑞<sup>2</sup>, 朱筱俊<sup>3</sup>, 杨 建<sup>1</sup>

(1. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 河南工业大学 土木建筑学院, 河南 郑州 450001;  
3. 东南大学建筑设计研究院有限公司, 江苏 南京 210096)

**摘要:**针对工程水泥基复合材料(ECC)用于板柱结构柱周围局部实心区域形成的 ECC/RC 空心楼盖板柱节点,可减少结构本身自重,充分发挥 ECC 材料高强度、高延性和抗剪性能好等特点,以 ECC 强度、ECC 面积、暗梁为参数,对 ECC/RC 空心楼盖板柱节点进行抗冲切性能数值分析研究。结果表明:ECC 材料可显著提高空心楼盖板柱节点的抗冲切承载力和刚度,改善节点的变形能力和耗能能力,但未改变节点的破坏形态,节点仍发生冲切破坏;节点的抗冲切承载力随着 ECC 强度和 ECC 面积的提高而增大;当节点仅使用一种增强方式时,暗梁和 ECC 材料的抗冲切承载力分别为普通混凝土的 1.26 倍和 1.15 倍;与暗梁相比,ECC 材料对节点抗冲切承载力的提高效果更明显;与同时使用 ECC 材料和暗梁的节点相比,当节点仅使用 ECC 材料时,增大 ECC 面积对节点抗冲切承载力的提高效果更为明显;在进行空心楼盖板柱结构设计时,建议同时使用暗梁和 ECC 材料,保证节点有较高极限承载力的同时,兼顾良好的变形能力和耗能能力。

**关键词:**ECC;抗冲切承载力;数值分析;板柱节点;空心楼盖

**中图分类号:**TU398 **文献标志码:**A

## Punching Shear Behavior of ECC/RC Hollow Floor Slab-column Connection

DANG Long-ji<sup>1</sup>, LIANG Shu-ting<sup>1</sup>, PANG Rui<sup>2</sup>, ZHU Xiao-jun<sup>3</sup>, YANG Jian<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, Henan, China;  
3. Architects & Engineers Co., Ltd of Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

**Abstract:** Engineered cementitious composite (ECC) is used in local solid area around the column of slab-column structure to form ECC/RC hollow floor slab-column connection(HSEC), which not only has light weight structure, but also makes full use of the characteristic of high strength, high ductility and high shear strength of ECC. The punching shear behavior of HSEC was evaluated through numerical simulation analysis of ECC strength, ECC area and hidden beam. The results show that ECC can increase punching shear capacity and stiffness, improve plastic deformation capacity and energy dissipation capability, but cannot change the failure mode of HSEC, and the connection still has a punching shear failure. The punching shear capacity can be increased as ECC strength and ECC area increase. The punching shear capacities of specimens with ECC and hidden beam are 1.26 and 1.15 times of the punching shear capacity of normal concrete when the unique enhanced method is used. ECC has a better effect in improving the

收稿日期:2018-05-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51778214);河南省科技攻关计划项目(152102210066);江苏省高校自然科学基金项目(2016TM045J)

作者简介:党隆基(1992-),男,河南驻马店人,工学博士研究生,E-mail:danglongji0305@163.com。

connections' punching shear capacity in comparison with hidden beam. Comparing with the connections with ECC and hidden beam both, the connection with ECC only has a better effect on improving the punching shear capacity when increasing ECC area. In the hollow floor slab-column design, it is proposed that hidden beam and ECC are used to resist shear force and improve plastic deformation capacity and energy dissipation capability.

**Key words:** ECC; punching shear capacity; numerical analysis; slab-column connection; hollow floor

## 0 引言

板柱结构由于其大柱网、大开间和降低层高的结构优势,在办公楼、住宅、多层厂房、仓库和公共建筑的大厅等结构中备受欢迎。多次震后震害调查发现,在地震作用下板柱节点往往发生脆性破坏,某一节点的破坏可能会导致结构的整体坍塌<sup>[1]</sup>。因此,如何提高板柱节点抗冲切承载力,改善节点的耗能能力,提高其抗震性能,是板柱结构研究中重点关注的课题。

针对上述问题,国内外学者开展了大量的研究工作,主要集中于抗冲切元件的开发和应用。截止到目前,多种抗冲切元件已被用于板柱结构中参与节点抗剪,主要包括箍筋、弯起钢筋、锚栓、型钢剪力架、抗剪栓钉等<sup>[2-3]</sup>。研究结果表明:不同抗冲切元件均可等同于抗剪钢筋参与节点抗剪,达到提高节点承载力和抑制裂缝开展的目的,延缓了节点的脆性破坏。

随着新型材料的开发,越来越多的新型材料被用于板柱结构中<sup>[4-5]</sup>,ECC作为一种高性能纤维增强水泥复合基材料,与钢筋具有良好的变形协调能力,可提高混凝土结构的强度、延性、韧性、抗疲劳、抗冲击等性能<sup>[6]</sup>。自20世纪90年代美国Michigan大学的Li等<sup>[7]</sup>提出ECC材料以来,ECC已被广泛应用于建筑结构中,如简支梁<sup>[8]</sup>、剪力墙<sup>[9]</sup>、梁柱节点<sup>[10]</sup>、框架<sup>[11]</sup>等,研究结果表明:在梁受拉区、剪力墙塑性铰区、梁柱节点核心区等关键耗能部位使用ECC材料可提高构件的承载能力和耗能能力,延缓构件的脆性破坏,有效提高结构在地震作用下的安全性和耐久性。

现有研究表明,当构件发生剪切破坏时,ECC材料对承载力和耗能能力的提高效果更为明显<sup>[12]</sup>。目前可查的文献中关于ECC材料对板柱节点抗冲切性能的研究鲜有报道。针对上述研究现状,本文将ECC材料用于柱周围局部实心区域,形成ECC/RC空心楼盖板柱节点(HSC),采用ABAQUS有限

元分析软件研究ECC强度、ECC面积、暗梁等参数对板柱节点抗冲切性能的影响,为ECC在板柱结构的应用提供参考依据。

## 1 研究对象

由于板柱结构楼盖自重较大,板柱交接区域负荷严重,为此课题组开发了现浇空心楼盖板柱增强节点,并进行了节点抗冲切性能的试验研究<sup>[2]</sup>。在试验研究的基础上,以空心楼盖板柱节点为研究对象,将ECC材料用于节点周围楼盖局部实心区域,以形成ECC/RC空心楼盖板柱节点(HSEC),节点示意图见图1。局部实心区域外边缘距平行柱边的距离为200 mm,楼板保护层厚度为10 mm,空心率为25.73%,钢筋均采用HRB400级,柱纵筋直径为16 mm,柱箍筋直径为8 mm,板筋直径为8 mm。

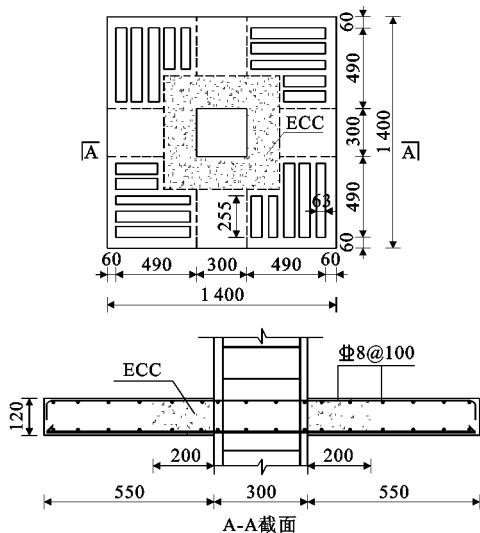


图1 HSEC示意图(单位:mm)

Fig. 1 Diagram of HSEC (Unit:mm)

## 2 数值分析方法

### 2.1 材料本构模型

为了便于计算,钢筋不考虑屈服平台,采用典型的双折线本构模型。普通混凝土本构采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[13]</sup>提供的塑性损

伤模型。ECC 作为一种高延性材料,其抗压强度和抗拉强度与普通混凝土类似,但是压缩特性明显高于普通混凝土<sup>[14]</sup>,其极限拉伸应变可以达到普通混凝土的 300 倍<sup>[15]</sup>,在拉伸荷载作用下,ECC 混凝土的受力过程可分为初裂、拉伸硬化和拉伸软化 3 个阶段。

本课题组根据能量等价原理,提出了适用于 ABAQUS 非线性分析的 ECC 塑性损伤模型。在推导 ECC 塑性损伤模型损伤因子时,采用以下假定:

(1)单轴压缩应力-应变曲线软化段简化为双折线<sup>[16]</sup>,如图 2 所示。单轴拉伸应力-应变曲线采用三折线<sup>[17-18]</sup>,如图 3 所示。图 2,3 中, $\epsilon_c^{el}$  为考虑损伤的 ECC 受压弹性应变, $\epsilon_c^{\sim pl}$ , $\epsilon_c^{\sim in}$  分别为 ECC 受压塑性应变和受压非弹性应变, $\epsilon_{0c}^{el}$  为材料无损伤的受压弹性应变, $\epsilon_i^{\sim ck}$  为开裂应变, $\epsilon_{0i}^{el}$ , $\epsilon_i^{el}$  分别为无损的 ECC 受拉应变弹性和考虑损伤的 ECC 受拉应变弹性, $\epsilon_i^{\sim pl}$  为 ECC 受拉塑性应变, $d_c$  为受压损伤因子, $d_t$  为受拉损伤因子, $\epsilon_{un}$ , $\sigma_{un}$  分别为卸载点的应变和应力。

(2)任何受力阶段均符合平截面假定。

(3)不考虑钢筋和 ECC 之间黏结滑移的影响。

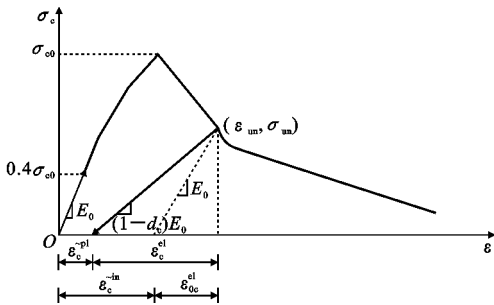


图 2 受压应力-应变关系

Fig. 2 Compression Stress-strain Relation

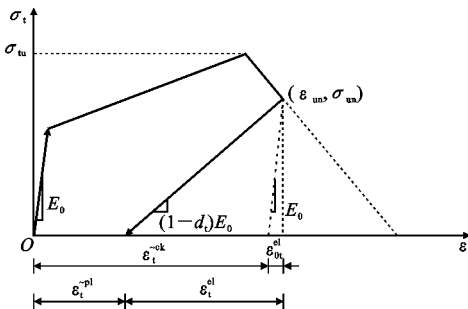


图 3 受拉应力-应变关系

Fig. 3 Tension Stress-strain Relation

ECC 材料的应力-应变关系表达式如下:

(1)ECC 材料受压应力-应变计算表达式为

$$\sigma_c = \begin{cases} E_0 \epsilon & 0 \leq \epsilon < \epsilon_{0.4} \\ E_0 \epsilon (1 - \alpha) & \epsilon_{0.4} \leq \epsilon < \epsilon_{c0} \\ \sigma_{c0} - \sigma_{c0} \frac{\epsilon - \epsilon_{c0}}{\epsilon_{c0}} & \epsilon_{c0} \leq \epsilon < 1.5 \epsilon_{c0} \\ 0 & 1.5 \epsilon_{c0} \leq \epsilon < \epsilon_{cu} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\sigma_c$  为受压应力; $E_0$  为 ECC 初始弹性模量; $\epsilon$  为对应于 ECC 材料应力状态的应变; $\epsilon_{0.4}$  为应力上升段应力为 40% 极限强度时的应变; $\epsilon_{c0}$  为峰值抗压强度时的应变; $\alpha$  为应变硬化阶段弹性模量的折减系数, $\alpha = a\epsilon E_0 / \sigma_{c0} - b$ , $a = 0.308$ , $b = 0.124$ , $\sigma_{c0}$  为峰值抗压强度; $\epsilon_{cu}$  为极限压应变。

(2)ECC 材料受拉应力-应变计算表达式为

$$\sigma_t = \begin{cases} \frac{\sigma_{tc}}{\epsilon_{tc}} \epsilon & 0 \leq \epsilon < \epsilon_{tc} \\ \sigma_{tc} + (\sigma_{tu} - \sigma_{tc}) \frac{\epsilon - \epsilon_{tc}}{\epsilon_{tu} - \epsilon_{tc}} & \epsilon_{tc} \leq \epsilon < \epsilon_{tu} \\ \frac{\epsilon_{mu} - \epsilon}{\epsilon_{mu} - \epsilon_{tu}} \sigma_{tu} & \epsilon_{tu} \leq \epsilon < \epsilon_{mu} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\sigma_t$  为受拉应力; $\sigma_{tc}$  为初裂拉应力; $\epsilon_{tc}$  为拉伸初裂强度对应的应变; $\sigma_{tu}$  为饱和裂缝结束时拉应力; $\epsilon_{tu}$  为饱和裂缝结束时拉应变; $\epsilon_{mu}$  为极限拉应变。

根据 Amrane 和 Sidoroff 的能量等价原理<sup>[19]</sup>,应力作用在受损材料产生的弹性余能与作用在无损材料产生的弹性余能在形式上相同,不同的是,求解无损材料上的弹性余能时用应力和无损的弹性模量,求解有损材料上的弹性余能时用等效应力和损伤时的弹性模量。

根据 Najar 的损伤理论,未受损伤材料的弹性余能  $W_0^e$  为

$$W_0^e = W_0 = \frac{E_0 \epsilon^2}{2} = \frac{\sigma^2}{2E_0} \quad (3)$$

有损伤材料的等效弹性余能  $W_d^e$  为

$$W_d^e = \frac{\bar{\sigma}^2}{2E_d} \quad (4)$$

$$\bar{\sigma} = (1-d)\sigma \quad (5)$$

式中: $\sigma$  为应力; $\bar{\sigma}$  为有效应力; $E_d$  为损伤材料弹性模量; $d$  为损伤因子。

将式(5)代入式(4),并令式(4)等于式(3),可得

$$E_d = E_0 (1-d)^2 \sigma \quad (6)$$

由此可得应力与应变的关系为

$$\sigma = E_0 (1-d)^2 \epsilon \quad (7)$$

将式(1)和式(2)代入式(5)可得,ECC 材料的受压损伤因子  $d_c$  和受拉损伤因子  $d_t$  分别为

$$d_c = \begin{cases} 0 & 0 \leq \epsilon < \epsilon_{0.4} \\ 1 - \sqrt{1 - \alpha} & \epsilon_{0.4} \leq \epsilon < \epsilon_{c0} \\ 1 - \sqrt{\frac{\sigma_{c0}(2\epsilon_{c0} - \epsilon)}{\epsilon_{c0} E_0 \epsilon}} & \epsilon_{c0} \leq \epsilon < 1.5\epsilon_{c0} \\ 1 - \sqrt{\frac{0.5\sigma_{c0}(\epsilon - \epsilon_{cu})}{E_0(1.5\epsilon_{c0} - \epsilon_{cu})\epsilon}} & 1.5\epsilon_{c0} \leq \epsilon < \epsilon_{cu} \end{cases} \quad (8)$$

$$d_t = \begin{cases} 0 & 0 \leq \epsilon < \epsilon_{tc} \\ 1 - \sqrt{\frac{\sigma_{tc}}{\epsilon E_0} + \frac{(\sigma_{tu} - \sigma_{tc})(\epsilon - \epsilon_{tc})}{E_0(\epsilon_{tu} - \epsilon_{tc})\epsilon}} & \epsilon_{tc} \leq \epsilon < \epsilon_{tu} \\ 1 - \sqrt{\frac{\sigma_{tu}(\epsilon_{mu} - \epsilon)}{E_0(\epsilon_{mu} - \epsilon_{tu})\epsilon}} & \epsilon_{tu} \leq \epsilon < \epsilon_{mu} \end{cases} \quad (9)$$

2.2 有限元分析验证

为验证 ECC 本构关系的适用性和数值分析的准确性,选用 ECC/RC 装配式剪力墙结构低周反复荷载试验<sup>[20]</sup>进行分析,结果表明:试验荷载-位移曲线的初始刚度略小于数值分析所得曲线的初始刚度;数值分析的单向推覆最大荷载为 886.2 kN,试验得到的最大荷载为 987.2 kN(取正反向峰值荷载的平均值),相对误差为 10.2%,因此 ECC 本构关系的建立是合理可靠的。

由于目前可查的文献中没有关于 ECC/RC 板柱节点试验研究的报道,文献[21]给出了 RC 空心楼盖板柱节点的建模方法,且数值分析结果与试验结果吻合较好,因此本文可采取文献[21]的建模方法。节点数值分析模型中柱纵筋的屈服强度和极限强度分别为 463 MPa 和 643 MPa;柱箍筋和板筋的屈服强度和极限强度分别为 535 MPa 和 667 MPa;板筋的屈服强度和极限强度为 530 MPa 和 657 MPa,数值分析模型采用的混凝土主要参数如表 1 所示。

表 1 混凝土主要参数  
Tab. 1 Main Parameters of Concrete

强度等级	$f_c$ /MPa	$f_t$ /MPa	$E$ /MPa	强度等级	$f_c$ /MPa	$f_t$ /MPa	$E$ /MPa
C50	32.40	2.64	34 500	E50	32.74	3.91	13 100
C60	38.50	2.85	36 000	E60	38.93	4.63	15 000
C70	44.50	2.99	37 000	E70	44.80	5.23	18 000
C80	50.20	3.11	38 000	E80	50.20	5.90	20 500

注:E50~E80 表示在柱周围局部实心区域使用 ECC 材料的普通混凝土 C50~C80; $f_c$  为抗压强度; $f_t$  为抗拉强度; $E$  为弹性模量。

3 参数分析

基于 ECC 材料自身优越性和性价比的综合考虑,选择在柱周围局部实心区域使用 ECC 材料,在减少结构自重的前提下,充分发挥 ECC 材料抗剪、

抗疲劳和耗能好等特征,提高板柱节点的抗冲切性能,又同时兼顾经济性与可行性,但目前 ECC 强度、ECC 面积及暗梁对空心楼盖板柱节点抗冲切性能的影响还不够明确,因此有必要对上述参数进行研究,寻找合理的构造措施,为此类节点的设计和工程应用提供参考。

3.1 ECC 强度

以 HSC 为研究对象,分别研究强度为 C50~C80 普通混凝土和 E50~E80 混凝土 2 种情况下节点的抗冲切性能。图 4 给出了上述 2 种情况下的荷载-位移曲线。

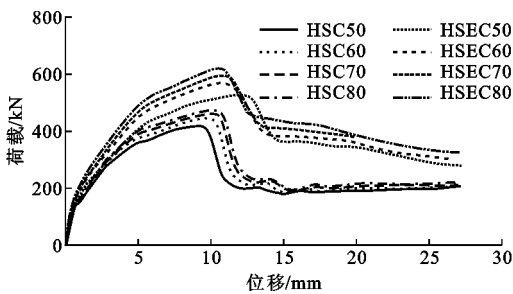


图 4 荷载-位移曲线 1  
Fig. 4 Load-displacement Curves 1

由图 4 可知,板柱节点的抗冲切承载力和刚度随着混凝土强度的提高而增大,但抗冲切承载力的提高幅度越来越小。由表 2 可知:ECC 材料可显著提高板柱节点的抗冲切承载力,掺加 ECC 材料后,HSEC50,HSEC60,HSEC70 和 HSEC80 的节点抗冲切承载力分别提高了 26%,29%,29%,31%;2 种情况下板柱节点的荷载-位移曲线相似,延性系数基本接近,节点均发生冲切破坏,掺加 ECC 材料并未改变节点的破坏形态,但节点的屈服位移和破坏位移均有提高,试件的变形和耗能更好。

图 5 和图 6 分别为试件 HSC50 和试件 HSEC50 的混凝土损伤云图。由图 5 和图 6 可知,混凝土受拉损伤区域首先出现在板底板柱交界处,预示着试件 HSC50 和试件 HSEC50 初始裂缝均出现在板底板柱交界处。随着试件的持续变形,板底损伤区域沿对角线逐渐延伸加重,板顶损伤区域在板顶四角逐渐延伸加重。由于柱周围局部实心区域使用 ECC 材料,与试件 HSEC50 相比,试件 HSC50 在局部实心区域外的板顶四角区域和板底对角线区域损伤更为严重。试件 HSC50 接近极限荷载时,板顶板柱交界处开始出现损伤,最终在试件达到破坏荷载时,板柱交界处损伤严重,而试件 HSEC50 在板顶板柱交界处并未出现损伤,且板底 ECC 区域损伤较严重区域仅仅位于板底板柱交界处。

表 2 试件数值计算结果

Tab. 2 Numerical Computing Results of Specimens

试件编号	破坏形态	$\Delta_u$ /mm	$F_u$ /kN	$\Delta_l$ /mm	$F_l$ /kN	$\Delta_f$ /mm	$F_f$ /kN	$\mu_\Delta$	$F_1/F_2$	备注
HSC50	冲切破坏	2.85	279.85	9.15	419.68	10.10	356.73	3.54		$F_{C50-2}$
HSC60	冲切破坏	2.85	292.41	9.75	443.41	10.73	376.00	3.76		$F_{C60-2}$
HSC70	冲切破坏	3.00	306.56	10.20	461.55	11.00	392.32	3.67		$F_{C70-2}$
HSC80	冲切破坏	3.15	318.80	10.20	474.87	11.17	403.64	3.55		$F_{C80-2}$
HSEC50	冲切破坏	3.90	354.07	12.00	528.34	13.50	447.01	3.46	1.26	$F_{E50-1}$
HSEC60	冲切破坏	3.75	380.90	10.65	570.02	12.53	484.51	3.34	1.29	$F_{E60-1}$
HSEC70	冲切破坏	3.75	397.54	10.65	595.25	12.35	505.96	3.29	1.29	$F_{E70-1}$
HSEC80	冲切破坏	3.68	413.53	10.50	620.30	11.93	527.25	3.24	1.31	$F_{E80-1}$
LSE100	冲切破坏	3.20	308.07	8.70	462.10	10.00	392.79	3.13		$F_2$
LSE150	冲切破坏	3.56	333.24	10.35	499.86	12.05	424.88	3.38	1.08	$F_1$
HSEC50	冲切破坏	3.90	354.07	12.00	528.34	13.50	447.01	3.46	1.14	$F_1$
LSH200	弯曲破坏	3.31	320.65	12.75	480.98	25.00	453.94	7.55	1.04	$F_1$
LSEH100	弯曲破坏	3.85	364.05	13.83	545.35	30.85	463.55	8.01		$F_2$
LSEH150	弯曲破坏	3.90	377.24	14.53	565.86	30.28	480.96	7.77	1.04	$F_1$
LSEH200	弯曲破坏	4.14	390.29	16.80	585.44	29.64	497.62	7.16	1.07	$F_1$
HSC50	冲切破坏	2.85	279.85	9.15	419.68	10.10	356.73	3.54		$F_2$
HSEC50	冲切破坏	3.90	354.07	12.00	528.34	13.50	447.01	3.46	1.26	$F_1$
LSH200	弯曲破坏	3.31	320.65	12.75	480.98	25.00	453.94	7.55	1.15	$F_1$
LSEH200	弯曲破坏	4.14	390.29	16.80	585.44	29.64	497.62	7.16	1.39	$F_1$

注: $\Delta_u$  为屈服位移; $F_u$  为屈服荷载; $\Delta_l$  为极限位移; $F_l$  为极限荷载; $\Delta_f$  为破坏位移; $F_f$  为破坏荷载; $\mu_\Delta$  为延性系数; $F_1$  为基准试件的极限荷载; $F_2$  为对比试件的极限荷载; $F_{C50-2}$  为试件混凝土强度为 C50 的极限荷载,2 表示基准试件; $F_{E50-1}$  为试件混凝土强度为 E50 的极限荷载,1 表示对比试件,其他类同;由于试件 LSH200 荷载-位移曲线没有下降段,以 25.00 mm 作为屈服位移,453.94 kN 作为屈服荷载。

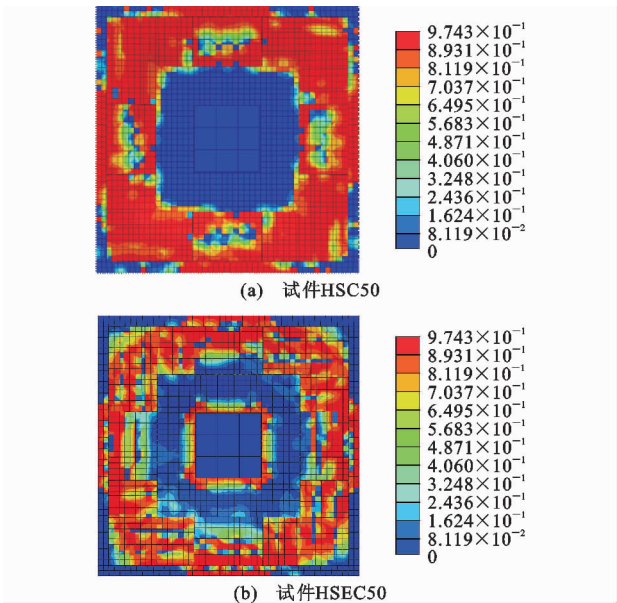


图 5 板顶受拉损伤云图

**Fig. 5 Damage Nephogram of Plate Top in Tension**

选取楼盖局部实心边缘处底部纵筋单元为研究对象,由钢筋应力-位移曲线(图 7)可知,试件 HSC50 和 HSEC50 钢筋强度基本相同,试件 HSC50 钢筋达到屈服强度时位移为 8.25 mm,试件

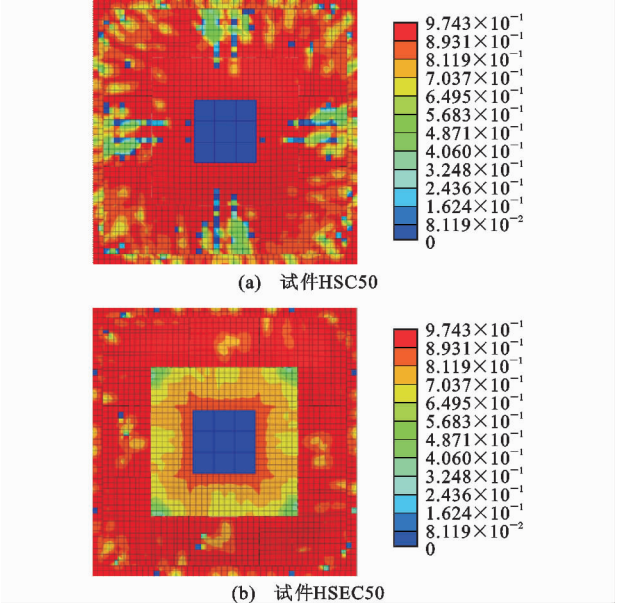


图 6 板底受拉损伤云图

**Fig. 6 Damage Nephogram of Plate Bottom in Tension**

HSEC50 钢筋达到屈服强度时位移为 10.8 mm。在钢筋达到峰值强度前,同等变形情况下,试件 HSEC50 的钢筋强度小于试件 HSC50,达到峰值强度后,试件 HSC50 基本保持不变,而试件 HSEC50

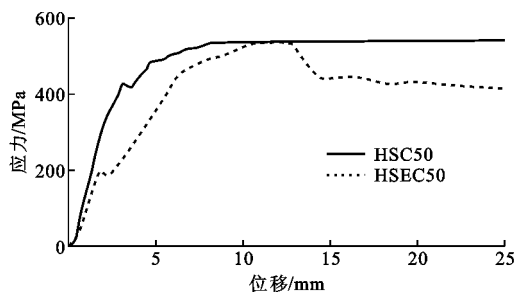


图 7 钢筋应力-位移曲线 1

Fig. 7 Stress-displacement Curves 1 of Rebar

出现了明显的下降段。选取局部实心区域柱角处单元为研究对象,通过分析试件的混凝土应力-应变曲线(图 8)可知,试件 HSEC50 实心部分混凝土的极限强度为 34.90 MPa,试件 HSC50 实心部分混凝土的强度为 30.07 MPa,在达到极限荷载之后,两者强度均有所下降,但试件 HSC50 下降更明显,在位移为 30 mm 时,其强度仅为 7.68 MPa,而试件 HSEC50 仍保持 20.63 MPa 的较高强度。试件 HSC50 在达到极限荷载之后,混凝土抗压强度逐渐减小,仅仅依靠纵向钢筋抵抗外部变形,因此钢筋仍保持较高的强度;试件 HSEC50 在达到极限荷载之后,混凝土仍保持较高的强度,试件依靠钢筋和混凝土共同抵抗外部变形,但两者可能不同时协调变形,导致钢筋在达到极限强度后有一定的下降。

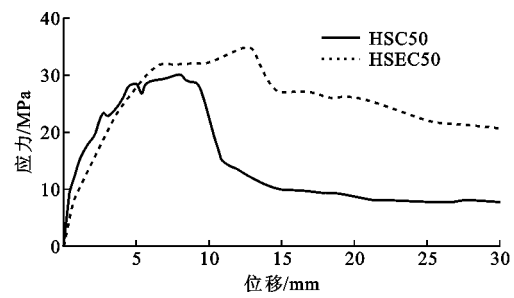


图 8 混凝土应力-位移曲线

Fig. 8 Stress-displacement Curves of Concrete

3.2 ECC 面积

以 HSEC50 为标准试件,研究 ECC 区域外边缘距平行柱边的距离  $l$  分别为 100,150,200 mm 三种情况下板柱节点的抗冲切性能,并与配置暗梁的板柱节点对比分析。图 9 给出了 4 种情况下的荷载-位移曲线。暗梁沿板纵横向轴线布置,节点构造详图如图 10 所示。

由图 9 和表 2 可知,节点的抗冲切承载力和延性系数随着  $l$  的增加而增大。当  $l$  由 100 mm 分别增加到 150 mm 和 200 mm 时,节点的抗冲切承载力分别提高了 8%和 14%,延性系数由 3.13 分别提

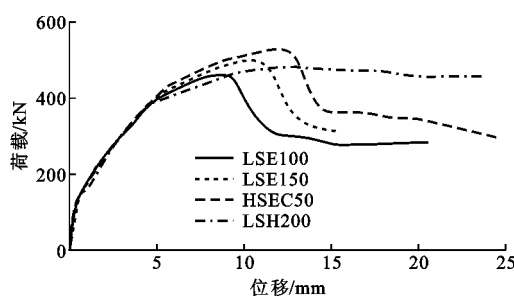


图 9 荷载-位移曲线 2

Fig. 9 Load-displacement Curves 2

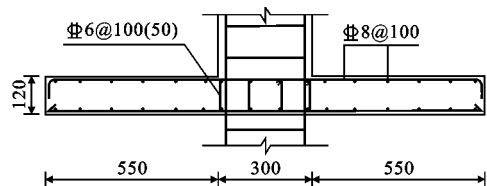


图 10 暗梁节点详图(单位:mm)

Fig. 10 Details of Connection with Hidden Beam (Unit:mm)

高到 3.38 和 3.46,节点变形能力更好。当节点配置暗梁时,试件 LSH200 的抗冲切承载力为 480.98 kN,分别为试件 LSE100,LSE150 和 HSEC50 的 1.04 倍、0.96 倍和 0.91 倍,与试件 LSE100 和 LSE150 较为接近,但试件 LSH200 的延性系数为 7.55,分别约为试件 LSE100,LSE150 和 HSEC50 的 2.41 倍、2.23 倍和 2.18 倍,试件 LSH200 发生弯曲破坏。

由上述分析可知,与配置暗梁相比,在柱周围楼盖局部实心区域使用 ECC 材料,其抗冲切承载力可等同于甚至高于配置暗梁的板柱节点,但节点的延性较差。因此,可考虑在某些不便于暗梁施工且对延性要求不高的非关键节点使用 ECC 材料,以保证节点具有较高的抗冲切承载力。

3.3 ECC/暗梁

以 LSH200 为标准试件,在同时使用 ECC 和暗梁的前提下,分别研究  $l$  为 100,150,200 mm 三种情况下板柱节点的抗冲切性能,图 11 给出了 3 种情况下节点的荷载-位移曲线。

由图 11 和表 2 可知,在同时使用 ECC 和暗梁的前提下,板柱节点的抗冲切承载力随着  $l$  的增加而增大。当  $l$  由 100 mm 分别增加到 150 mm 和 200 mm 时,节点的抗冲切承载力分别提高了 4%和 7%,延性系数由 8.01 分别下降到 7.77 和 7.16,但整体来说,节点变形能力较好,节点的破坏形态为弯曲破坏;与图 8 对比分析可知,当  $l$  由 100 mm 分别

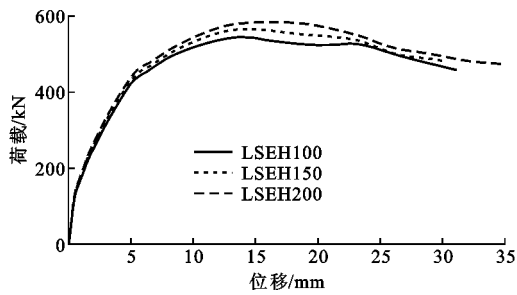


图 11 荷载-位移曲线 3

Fig. 11 Load-displacement Curves 3

增加到 150 mm 和 200 mm 时,节点的抗冲切承载力分别提高了 8%和 14%,说明单独使用 ECC 材料对节点抗冲切承载力提高效果更好,这是由于 ECC 材料和暗梁不能同时协调变形,二者抗力作用不能充分发挥,与弯曲破坏相比,构件发生剪切破坏时,ECC 材料对承载力和耗能的提高效果更为明显,这与已有试验结果相吻合。

与单独使用 ECC 材料的试件对比可知,当  $l$  由 100 mm 分别增加到 150 mm 和 200 mm 时,同时使用暗梁和 ECC 材料的节点抗冲切承载力分别提高了 18%,13%,11%,提高幅度越来越小。因此可知,当局部实心 ECC 面积较小时,ECC 材料对节点抗冲切承载力的提高更明显。

### 3.4 无暗梁、ECC、暗梁和 ECC/暗梁

针对上述研究,以试件 HSC50, HSEC50, LSH200, LSEH200 为研究对象,对比分析无暗梁、ECC、暗梁和 ECC/暗梁 4 种情况下节点的抗冲切性能,节点的荷载-位移曲线如图 12 所示。

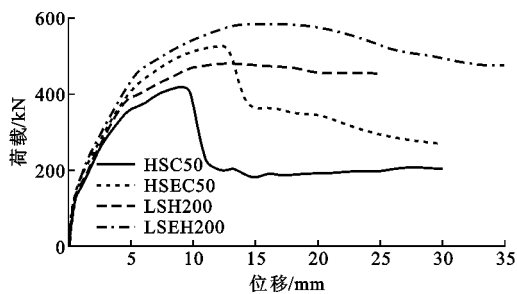


图 12 荷载-位移曲线 4

Fig. 12 Load-displacement Curves 4

由图 12 可知,试件 HSC50 的抗冲切承载力和延性系数分别为 419.68 kN 和 3.54,通过布置暗梁和使用 ECC 材料,试件 HSEC50, LSH200 和 LSEH200 的抗冲切承载力分别为试件 HSC50 的 1.26 倍、1.15 倍和 1.39 倍;试件 HSEC50, LSH200 和 LSEH200 的延性系数分别为试件 HSC50 的 0.98 倍、2.13 倍和 2.02 倍。

图 13 为节点钢筋应力-位移曲线。与试件

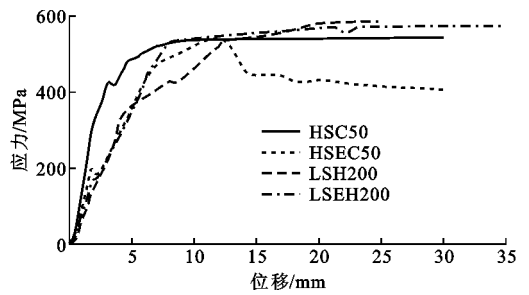


图 13 钢筋应力-位移曲线 2

Fig. 13 Stress-displacement Curves 2 of Rebar

HSC50 相比,试件 LSH200 前期钢筋强度增长较慢,但达到极限荷载后,钢筋强度仍保持平稳增长,节点抗冲切性能更好;与试件 HSEC50 相比,试件 LSEH200 前期钢筋强度增长基本与 HSEC50 相同,但达到极限荷载后,钢筋强度并未出现下降,而与试件 LSH200 相同,仍平稳增长,节点仍具有一定的安全储备。

## 4 结 语

(1)ECC 材料可显著提高空心楼盖板柱节点的抗冲切承载力,改善节点的变形能力和耗能能力,但并未改变节点的破坏形态,节点仍发生冲切破坏。

(2)节点的抗冲切承载力随着 ECC 强度和 ECC 面积的提高而增大;与同时使用 ECC 材料和暗梁的节点相比,当节点仅使用 ECC 材料时,增大 ECC 材料面积对节点抗冲切承载力的提高效果更明显。

(3)当节点仅使用一种增强方式时,暗梁和 ECC 材料的抗冲切承载力分别为普通混凝土的 1.26 倍和 1.15 倍,延性系数分别为普通混凝土的 0.98 倍和 2.13 倍,暗梁可使节点发生弯曲破坏,但 ECC 材料对节点抗冲切承载力的提高效果更好。

(4)当节点同时使用 ECC 材料和暗梁时,节点抗冲切承载力和延性系数分别为普通混凝土节点的 1.39 倍和 2.02 倍,节点发生弯曲破坏。

(5)在进行空心楼盖板柱结构设计时,建议同时使用暗梁和 ECC 材料,这样可以在保证节点有较高抗冲切承载力的同时兼顾良好的变形和耗能能力;对变形能力要求不高的非关键节点,可以考虑仅在柱周围实心部分使用适当区域的 ECC 材料;对变形能力要求较高而承载力要求不高的节点,可以考虑仅布置暗梁。

### 参考文献:

### References:

[1] 程懋堃. 关于板柱结构的适用高度[J]. 建筑结构学

- 报,2003,24(1):1-6.
- CHENG Mao-kun. Suitable Height of Flat Plate-shear Wall Structure in Seismic Zone[J]. Journal of Building Structures,2003,24(1):1-6.
- [2] 党隆基. 现浇空心楼盖板柱增强节点抗冲切性能试验研究[D]. 郑州:河南工业大学,2016.
- DANG Long-ji. Experimental Study on Punching Shear Behavior of the Cast-in-situ Hollow Floor Slab-column Reinforced Connection[D]. Zhengzhou:Henan University of Technology,2016.
- [3] DAM T X, WIGHT J K, PARRA-MONTESINOS G J. Behavior of Monotonically Loaded Slab-column Connections Reinforced with Shear Studs [J]. ACI Structural Journal,2017,114(1):221-232.
- [4] EL-ENEINA H A, AZIMI H, SENNAH K, et al. Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Slab-column Connection Using CFRP Sheets[J]. Construction and Building Materials,2014,57:126-137.
- [5] NGUYEN-MINH L, ROVNAK M. Punching Shear Resistance of Interior GFRP Reinforced Slab-column Connections[J]. Journal of Composites for Construction,2013,17(1):2-13.
- [6] ZHANG J, LEUNG C K Y, CHEUNG Y N. Flexural Performance of Layered ECC-concrete Composite Beam[J]. Composites Science and Technology,2006,66(11):1501-1512.
- [7] LI V C, LEUNG C K Y. Steady State and Multiple Cracking of Short Random Fiber Composites [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1992, 188 (11): 2246-2264.
- [8] ALYOUSIF A, ANIL O, SAHMARAN M, et al. Comparison of Shear Behaviour of Engineered Cementitious Composite and Normal Concrete Beams with Different Shear Span Lengths[J]. Magazine of Concrete Research,2016,68(5):217-228.
- [9] YANG J, LIANG S T, ZHU X J, et al. Seismic Behavior of Precast Concrete Coupled Shear Walls with Engineered Cementitious Composite (ECC) in the Critical Cast-in-place Regions[J]. Science China Technological Sciences,2017,60(8):1244-1254.
- [10] KANG S B, TAN K H, YANG E H. Progressive Collapse Resistance of Precast Beam-column Sub-assemblies with Engineered Cementitious Composites[J]. Engineering Structures,2015,98:186-200.
- [11] 马涛. 装配整体式 ECC/RC 组合框架抗震性能研究[D]. 南京:东南大学,2013.
- MA Tao. Study on Seismic Performance of the Precast ECC/RC Composite Frame[D]. Nanjing: Southeast University,2013.
- [12] 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.
- [13] GB 50010—2010,混凝土结构设计规范[S].
- GB 50010—2010,Code for Design of Concrete Structures[S].
- [14] LI V C. A Simplified Micromechanical Model of Compressive Strength of Fiber Reinforced Cementitious Composites[J]. Cement and Concrete Composites, 1992,14(2):131-141.
- [15] LI V C. On Engineering Cementitious Composites (ECC)[J]. Journal of Advanced Concrete Technology,2003,1(3):215-229.
- [16] ZHOU J J, PAN J L, LEUNG C K Y. Mechanical Behavior of Fiber-reinforced Engineered Cementitious Composites in Uniaxial Compression[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27 (1): 040141111.
- [17] MENG D, HUANG T, ZHANG Y X, et al. Mechanical Behaviour of a Polyvinyl Alcohol Fibre Reinforced Engineered Cementitious Composite (PVA-ECC) Using Local Ingredients[J]. Construction and Building Materials,2017,141:259-270.
- [18] YU K Q, WANG Y C, YU J T, et al. A Strain-hardening Cementitious Composites with the Tensile Capacity up to 8%[J]. Construction and Building Materials,2017,137:410-419.
- [19] AMRANE M N, SIDOROFF F. Residual Modal Energy Evaluating of Fatigue Damaged Composite Structure[J]. Mechanics,2011,17(1):45-49.
- [20] 顾雯. ECC 增强装配式混凝土剪力墙结构设计参数分析[D]. 南京:东南大学,2017.
- GU Wen. Design Parameter Analysis of ECC Reinforced Concrete Shear Wall Structure[D]. Nanjing: Southeast University,2017.
- [21] 庞瑞,党隆基,倪红梅,等. 空心楼盖板柱增强节点抗冲切性能数值分析[J]. 工业建筑,2017,47(2):76-81.
- PANG Rui, DANG Long-ji, NI Hong-mei, et al. Numerical Study of Punching Shear Behavior of the Hollow Floor Slab-column Reinforced Connection[J]. Industrial Construction,2017,47(2):76-81.