

DOI:10.11918/202407067

# 煤矸石混凝土梁柱节点抗震性能试验

赵卫平<sup>1</sup>,冯钰玲<sup>1</sup>,徐璐<sup>2</sup>,胡锐<sup>1</sup>,徐阳<sup>3</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院,北京 100083;2. 中铁十六局集团路桥工程有限公司,北京 101500;  
3. 中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所,北京 100081)

**摘要:**为研究煤矸石混凝土梁柱节点的抗震性能,对6个足尺试件进行低周往复加载试验。对各试件的破坏模式、滞回曲线、骨架曲线、刚度退化、耗能能力等抗震指标进行分析,研究煤矸石骨料取代率(0、30%、50%、100%)和梁纵筋配筋率(0.67%、1.34%、2.09%)对抗震性能的影响。结果表明:节点破坏模式分为梁端弯曲破坏和节点区受剪破坏,破坏现象主要表现为节点区出现大量裂缝和梁端混凝土大量剥落,煤矸石混凝土梁柱节点破坏较普通混凝土的破坏更剧烈;煤矸石取代率低的试件的滞回曲线饱满,刚度退化慢,延性好,有较好的抗震性能;随着煤矸石取代率的增大,试件的滞回曲线有明显捏缩效应,且刚度退化加快,延性及耗能变差。增大梁纵筋配筋率可改善梁端混凝土的损伤,提高承载能力,但过高的配筋率将诱发节点发生剪切破坏,降低耗能能力和延性。

**关键词:**煤矸石混凝土;拟静力试验;框架十字节点;抗震性能;骨架曲线

**中图分类号:** TU375.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2025)10-0030-11

## Experiment on seismic performance of coal gangue concrete beam-column joints

ZHAO Weiping<sup>1</sup>, FENG Yuling<sup>1</sup>, XU Lu<sup>2</sup>, HU Rui<sup>1</sup>, XU Yang<sup>3</sup>

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;  
2. China Railway 16th Bureau Group Road & Bridge Engineering Co., Ltd., Beijing 101500, China;  
3. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

**Abstract:** To study the seismic performance of coal gangue concrete beam column joints, six full-scale specimens were prepared and subjected to low-cycle repeated loading tests. The analysis focused on various seismic indicators, including failure modes, hysteresis curves, skeleton curves, stiffness degradation, energy dissipation capacity. The effects of coal gangue aggregate replacement rates (0, 30%, 50% and 100%) and beam longitudinal reinforcement ratios (0.67%, 1.34%, and 2.09%) on the seismic performance were studied. The results showed that the failure modes of joints are bending failure at the beam end and shear failure at the node area. The failure primarily manifests as extensive cracking in the joint area and significant spalling of concrete at the beam ends, with coal gangue concrete beam-column joints exhibiting more severe damage compared to ordinary concrete. Specimens with low coal gangue replacement rates displayed full hysteretic curves, slow stiffness degradation, good ductility, and good seismic performance. As the replacement rate of coal gangue increases, the specimens exhibits a pronounced pinching effect in the hysteretic curves, along with accelerated stiffness degradation and reduced ductility and energy dissipation. Increasing the longitudinal reinforcement ratio of the beam can improve the damage to the concrete at the end of the beam and enhance its bearing capacity. However, excessively high reinforcement ratio may induce shear failure of the nodes, reducing their energy dissipation capacity and ductility.

**Keywords:** coal gangue concrete; quasi-static test; beam-column cross joint; seismic performance; skeleton curve

煤矸石制备成混凝土可用于路面基层、承重结构和砌体材料等以实现固体废物资源化利用<sup>[1-2]</sup>。学者们对煤矸石作为混凝土粗骨料进行了研究,探讨了煤矸石粗骨料的种类和质量浓度对混凝土力学性能的影响,结果表明,适量取代砾石而制备的煤矸石混凝土的力学性能与同等级普通混凝土的力学性

能接近<sup>[3-5]</sup>,其抗压强度可以达到C30混凝土的设计要求,适合配置中、低强度混凝土<sup>[6-7]</sup>。有学者把研究重点转向煤矸石混凝土在结构中的运用<sup>[8-9]</sup>,以实现建筑材料低耗能的宗旨。张殿惠等<sup>[10-12]</sup>对煤矸石混凝土梁柱节点进行的试验表明其破坏机制与普通混凝土梁柱节点的破坏机制相同,但其核心区

收稿日期:2024-07-23;录用日期:2024-09-19;网络首发日期:2024-11-12

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20241112.1024.002>

基金项目:国家自然科学基金(52278467)

作者简介:赵卫平(1981—),男,副教授,博士生导师

通信作者:赵卫平,zhaowp@cumtb.edu.cn

的延性较差。已有以自燃煤矸石为骨料建造的钢筋混凝土框架住宅楼,位于抗震设防 7 度地区,现浇钢筋混凝土、空心砌块、砌筑和抹灰砂浆全部采用煤矸石为粗细骨料<sup>[13]</sup>,实践证明采用全自燃煤矸石建造高层建筑,对于设计施工和使用都是切实可行的。

煤矸石结构松散,具有更多的片状颗粒和孔隙。当煤矸石用作粗骨料掺入后会导致混凝土抗压强度降低,破坏时煤矸石发生贯穿破坏<sup>[14]</sup>。随着煤矸石取代率的提高,混凝土的孔隙率增大,透水性增强,在一定程度上降低了混凝土的弹模、抗碳化性能和抗冻性能<sup>[15-16]</sup>。为促进煤矸石在建筑结构中的资源利用化,需要对煤矸石混凝土节点的抗震性能进行变参数分析。混凝土梁柱节点的抗震性能影响因素众多,包括配筋率、配箍率、轴压比、剪压比、混凝土强度和锚固方式等<sup>[17-19]</sup>。本文选取煤矸石取代率和梁纵筋配筋率为主要研究参数,制作了 6 个足尺煤矸石混凝土十字节点模型,通过低周往复加载试验探究节点的破坏特征、承载力和变形能力,并基于滞回曲线、骨架曲线、刚度退化和耗能能力对节点

的抗震性能进行评估。

## 1 试验

### 1.1 试验材料

试验采用 P. O 42.5 普通硅酸盐水泥作为胶凝材料,采用细度模数为 2.58 的河砂、5~20 mm 连续级配石灰岩作为骨料,煤矸石骨料购自灵寿县沃阳矿产品加工厂,主要化学成分(质量分数)为:SiO<sub>2</sub>(57.26%)、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(23.46%)、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(4.82%)、K<sub>2</sub>O(6.41%)、CaO(2.17%)、TiO<sub>2</sub>(0.59%)、Na<sub>2</sub>O(1.18%)、MnO(0.11%)、SO<sub>3</sub>(0.21%)、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(0.53%)、MgO(0.72%)。煤矸石天然放射性核素镭-226、钍-232、钾-40 的放射性比活度同时满足内照射指数  $I_{Ra} > 2.0$  和外照射指数  $I_{\gamma} > 2.0$ ,可按建筑行业正常生产工艺要求自由掺配。减水剂为聚羧酸高性能减水剂,天然碎石和煤矸石作为粗骨料实测物理性能指标见表 1,混凝土配合比设计见表 2。钢筋力学性能指标见表 3,钢筋应力-应变曲线如图 1 所示。

表 1 粗骨料物理性能指标

Tab. 1 Physical properties of coarse aggregate

类别	堆积密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	表观密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	吸水率/%	针片状质量分数/%	压碎指标/%
煤矸石	1 280	2 105	5.6	4	19.7
天然碎石	1 590	2 770	0.5	3	8.8

表 2 混凝土配合比设计

Tab. 2 Concrete mix design

种类	水灰比	水/(kg·m <sup>-3</sup> )	水泥/(kg·m <sup>-3</sup> )	砂子/(kg·m <sup>-3</sup> )	石子/(kg·m <sup>-3</sup> )	煤矸石/(kg·m <sup>-3</sup> )	减水剂掺量/%	$f_{cu}$ /MPa
普通混凝土(PCC)	0.45	200	445	512	1 193	0	0.5	47.03
煤矸石混凝土(CGC)-30%	0.38	180	474	509	831	356	0.7	44.93
煤矸石混凝土(CGC)-50%	0.30	160	520	501	584.5	584.5	0.8	37.40
煤矸石混凝土(CGC)-100%	0.25	130	520	510	0	1 190	1.2	20.90

注:混凝土材料单位为 kg/m<sup>3</sup>;减水剂掺量为胶凝材料的质量分数; $f_{cu}$  为 150 mm × 150 mm × 150 mm 混凝土立方体 28 d 抗压强度实测值。

表 3 钢筋力学性能指标

Tab. 3 Mechanical properties of steel bars

$\Phi$ /mm	$A_s$ /mm <sup>2</sup>	$E_s$ /GPa	$f_y$ /MPa	$f_u$ /MPa	$\Psi$ /%	$\delta$ /%
Φ8	50.27	212	405.00	636.05	48.67	36.67
Φ16	201.06	225	412.59	581.40	49.50	31.25
Φ20	314.16	244	442.00	613.74	50.15	34.67

注: $A_s$  为截面面积, $E_s$  为弹性模量, $f_y$   $f_u$  分别为屈服强度、极限强度, $\Psi$  为断面收缩率, $\delta$  为伸长率。

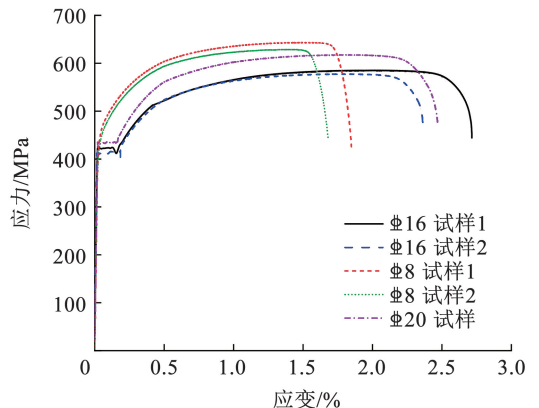


图 1 钢筋应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of reinforcement

### 1.2 试件设计

试验设计了 6 个足尺混凝土梁柱节点,变量对照组见图 2。试件尺寸及配筋见图 3。梁截面尺寸为 300 mm × 400 mm,柱截面尺寸为 400 mm × 400 mm,梁柱箍筋均选用 HRB400E 级直径 8 mm 的钢筋,梁箍筋采用单肢箍,柱采用复合箍;梁柱纵筋选用 HRB400E 级直径 16 mm 和 20 mm 的钢筋。分别制备普通混凝土 PCC、煤矸石混凝土 CGC,梁柱节点试件的设计参数详见表 4。

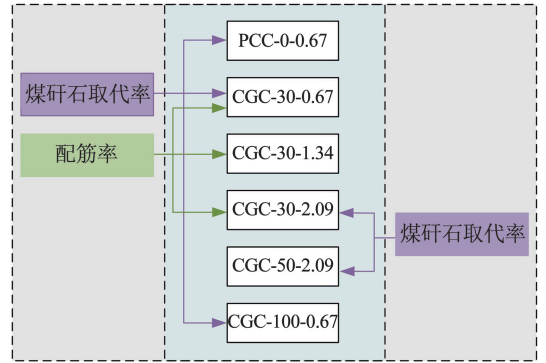


图 2 单一变量对照组

Fig. 2 Single variable comparison groups

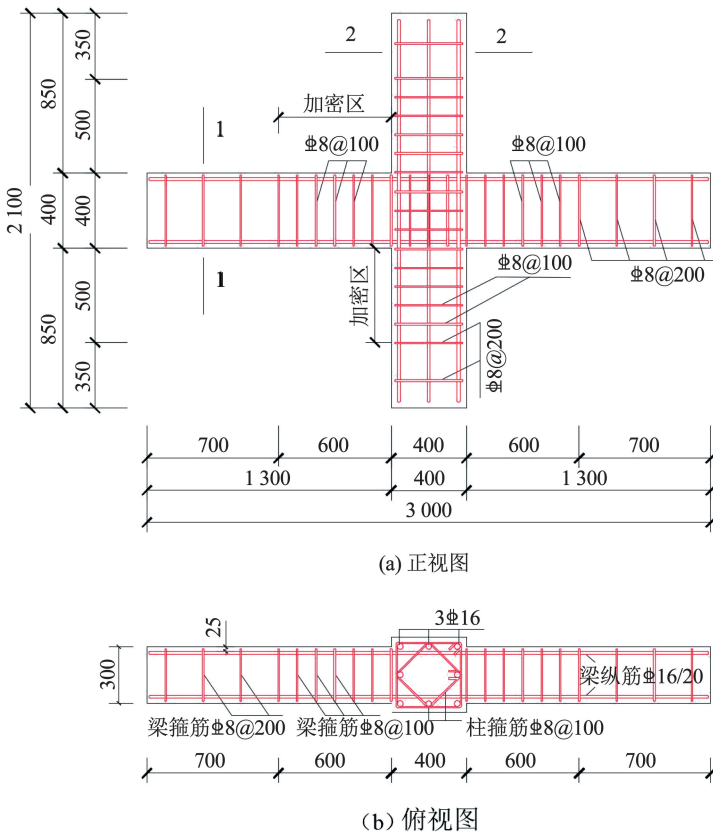


图 3 试件尺寸及配筋

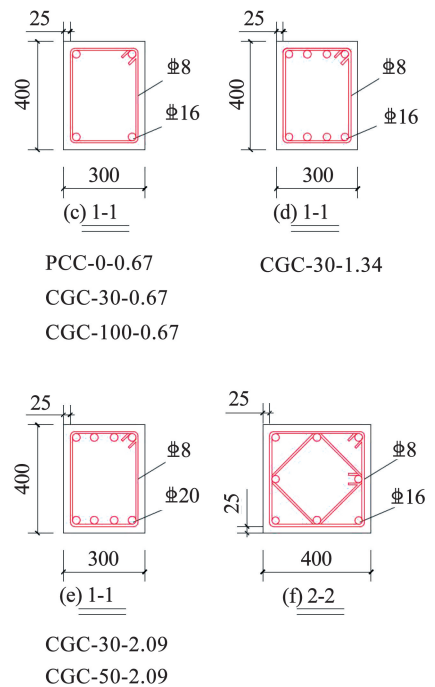
Fig. 3 Specimen size and reinforcement arrangement

表 4 试件设计参数

Tab. 4 Design parameters of specimen

试件编号	种类	取代率/%	配筋率/%
PCC-0-0.67	普通混凝土	0	0.67
CGC-30-0.67	煤矸石混凝土	30	0.67
CGC-30-1.34	煤矸石混凝土	30	1.34
CGC-30-2.09	煤矸石混凝土	30	2.09
CGC-50-2.09	煤矸石混凝土	50	2.09
CGC-100-0.67	煤矸石混凝土	100	0.67

注:试件编号含义为“混凝土类型-煤矸石取代率-配筋率”,例如,PCC-0-0.67 表示“普通混凝土梁柱节点,煤矸石取代率为 0,配筋率为 0.67%”。



单位: mm

### 1.3 试验设计

依据 JGJ/T 101—2015《建筑抗震试验规程》<sup>[20]</sup> 制定本次试验的加载制度,使用中国矿业大学(北京)结构实验室的多通道电压伺服加载系统(如图 4 所示),对梁端施加反复循环荷载。试验前,放松梁端伺服作动器,试件通过竖向千斤顶施加轴力,选取轴压比为 0.7,预加 10% 的轴力对试件调平对中,确保试件在同一水平面后柱端锁死夹具,施加轴力到预定荷载。调整梁端伺服作动器,两侧同时施加 1 kN 的荷载使其与试件贴紧,此时对静态数据采集系统平衡清零。采用等位移增量施加位移荷载,每级荷载值进行 1 次反复循环,每级位移增量为 5 mm,每次循环后暂停 2 min 待应变值稳定,以便观

测应变仪所监测的钢筋应变值和对试件裂缝发展进行描绘, 加载制度见图 5。达到下列条件时停止试验: 1) 试件的正向或反向承载力下降到最大承载力的 85% 左右; 2) 混凝土严重剥落, 试件拆装时可能威胁人员和设备的安全。

### 1.4 测点布置

通过钻铣床对梁中的钢筋纵肋进行精细加工, 确保纵肋通长铣, 从而实现钢筋的强度均匀分布, 开口深度为  $5\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ , 如图 6 所示。

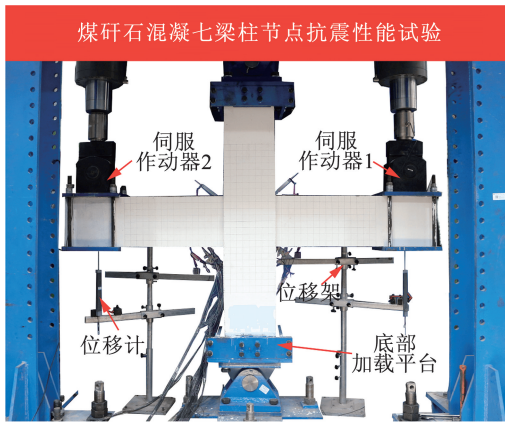


图 4 试验加载装置  
Fig. 4 Test loading device

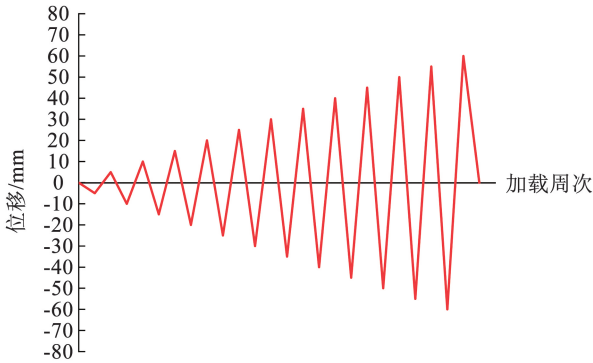


图 5 循环加载制度  
Fig. 5 Cyclic loading system

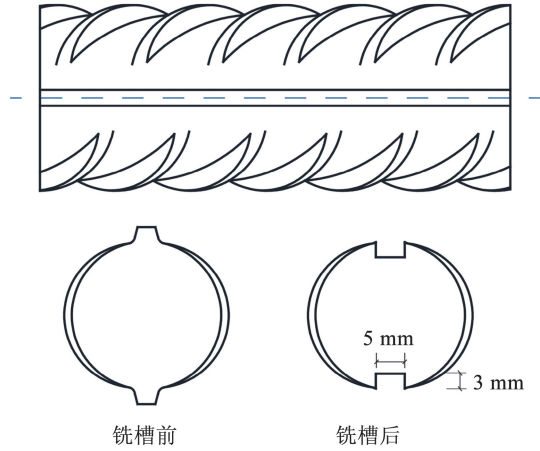
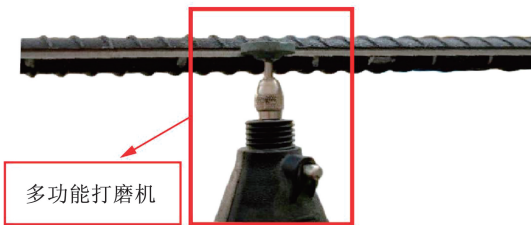
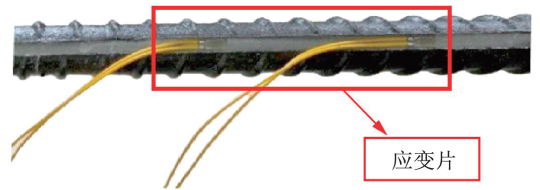


图 6 钢筋铣槽工艺  
Fig. 6 Reinforcement milling process

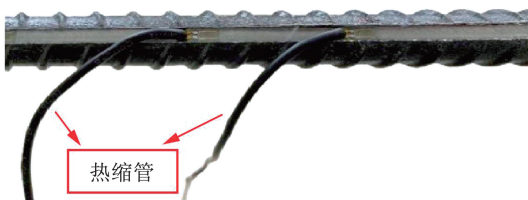
电磨机磨光键槽底面后使用酒精棉球清洁, 用 502 胶将应变片贴至键槽底面。应变片引用导线使用 HY-914 固化环氧黏结剂对键槽进行封装, 过程如图 7 所示。由于钢筋在梁柱交接位置处应力梯度变化较大, 梁柱节点界面左右延伸 100 mm 的位置加密应变片, 应变片间距为 25 mm, 其他位置间距为 50 mm, 梁纵筋应变片布置如图 8 所示。



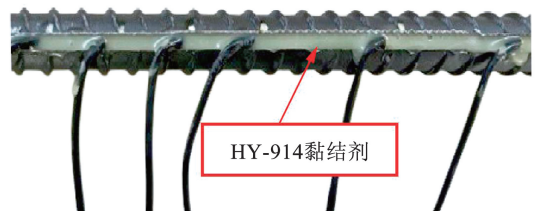
(a) 打磨钢筋



(b) 粘贴应变片



(c) 热缩管保护导线



(d) HY-914黏结剂覆盖热缩管应变片

图 7 贴应变片过程

Fig. 7 Strain gauge sticking process

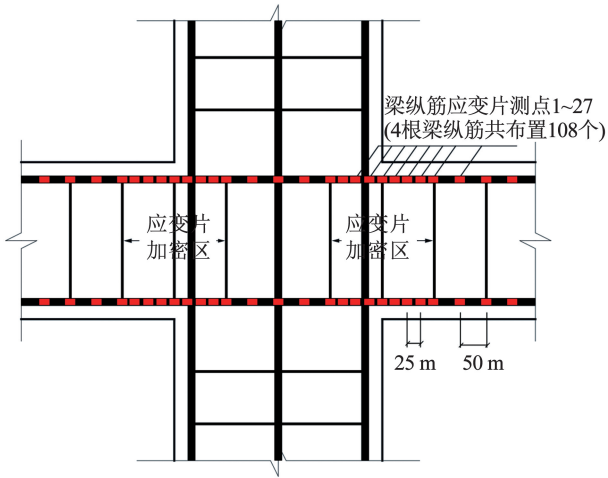


图 8 应变片测点布置

Fig. 8 Arrangement of strain gauges

## 2 试验现象及结果分析

### 2.1 试验现象及破坏形态

煤矸石混凝土梁柱节点和普通混凝土梁柱节点均经历了初裂—裂缝贯通—极限—最终破坏 4 个阶段:1)初裂。加载初期全部试件均处于弹性工作阶段,出现第一条微裂缝时的荷载为开裂荷载;2)裂缝贯通。混凝土节点试件靠近核心区的梁端首先形

成贯通主裂缝,继而核心区出现裂缝,梁端出现斜裂缝;3)极限。随着加载的继续增加,核心区两侧主裂缝宽度明显增加,斜裂缝数量显著增多;4)最终破坏。不再产生显著新裂缝,混凝土表面剥落,部分试件钢筋裸露。破坏阶段 6 个节点的裂缝分布见图 9(a)~(f)。

破坏模式包括梁端弯曲破坏和节点核心区剪切破坏两种形式。其中,试件 PCC-0-0.67、CGC-30-0.67、CGC-30-1.34、CGC-50-2.09 和 CGC-100-0.67 发生梁端弯曲破坏,试件 CGC-30-2.09 发生节点核心区剪切破坏。对比图 9(a)、(b)、(f)可以看出,低配筋率节点,随煤矸石取代率的增加节点核心开裂加剧,梁端塑性铰混凝土剥落现象明显;类似地,对比图 9(d)、(e)可以看出,高配筋率节点情况相似。对比图 9(b)、(c)、(d)可以看出,煤矸石取代率不变,增大梁纵筋配筋率,纵筋屈服时刻延后,有效地抑制了裂缝的开裂,限制了裂缝宽度;同时,纵筋和箍筋形成的钢筋笼对梁端塑性铰约束作用增强,促成了梁端裂缝多而密的分布。增大配筋率虽然有效地改善了梁端塑性铰混凝土的剥落,但纵筋的增加也导致传入节点的剪力更大,节点区域剪切裂缝增多,增加了节点剪切破坏的风险(CGC-30-2.09)。

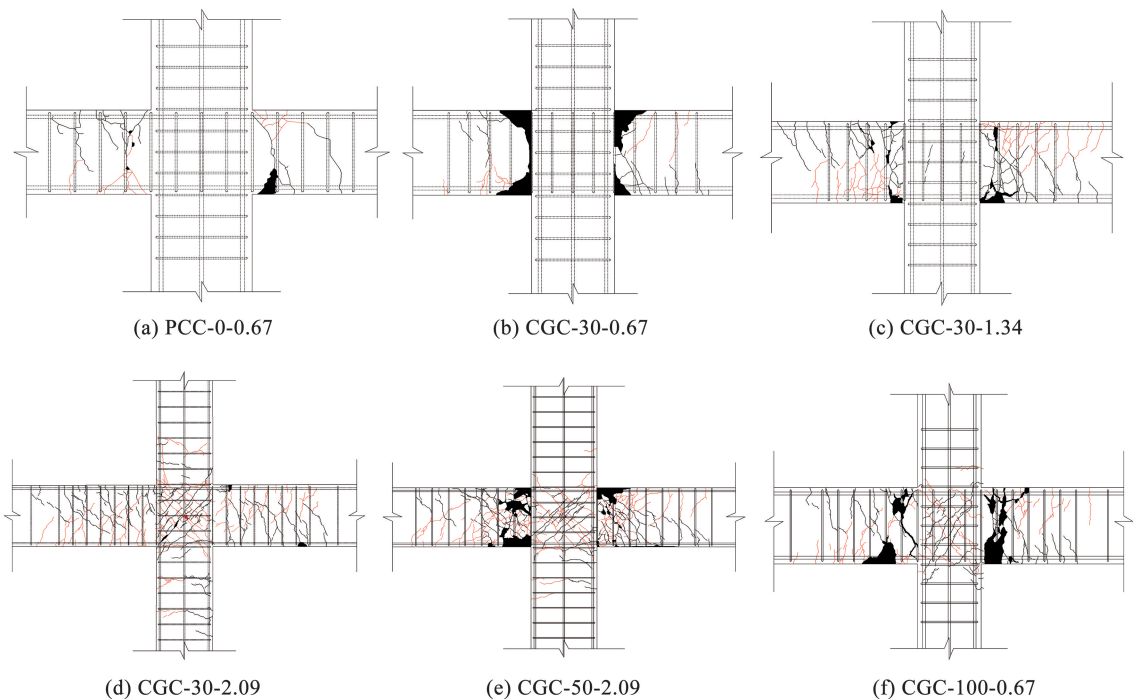


图 9 破坏形态与裂缝发展

Fig. 9 Failure pattern and crack development

### 2.2 滞回曲线

图 10 为试件的滞回曲线。对比图 10(a)、(b)、(f)可以看出,配筋率不变,增大煤矸石取代率,滞回

环由弓形逐渐发展成 Z 形,捏缩效应越来越明显,耗能能力变差。随着煤矸石取代率的增大,试件的承载能力有所下降。对比图 10(b)、(c)、(d)可以

看出,煤矸石取代率为 30% 时,增大梁纵筋配筋率可提高节点的极限承载力。然而,当配筋率提高至 2.09% 时,节点滞回曲线表现出非常明显的捏缩现象,结合破坏形态分析可知,高配筋率使传入节点剪

力过大,发生了节点剪切破坏。相同煤矸石取代率下,CGC-30-2.09 与 CGC-30-0.67、CGC-30-1.34 相比,在相同位移荷载下,梁纵筋配筋率高的试件承载力更高。

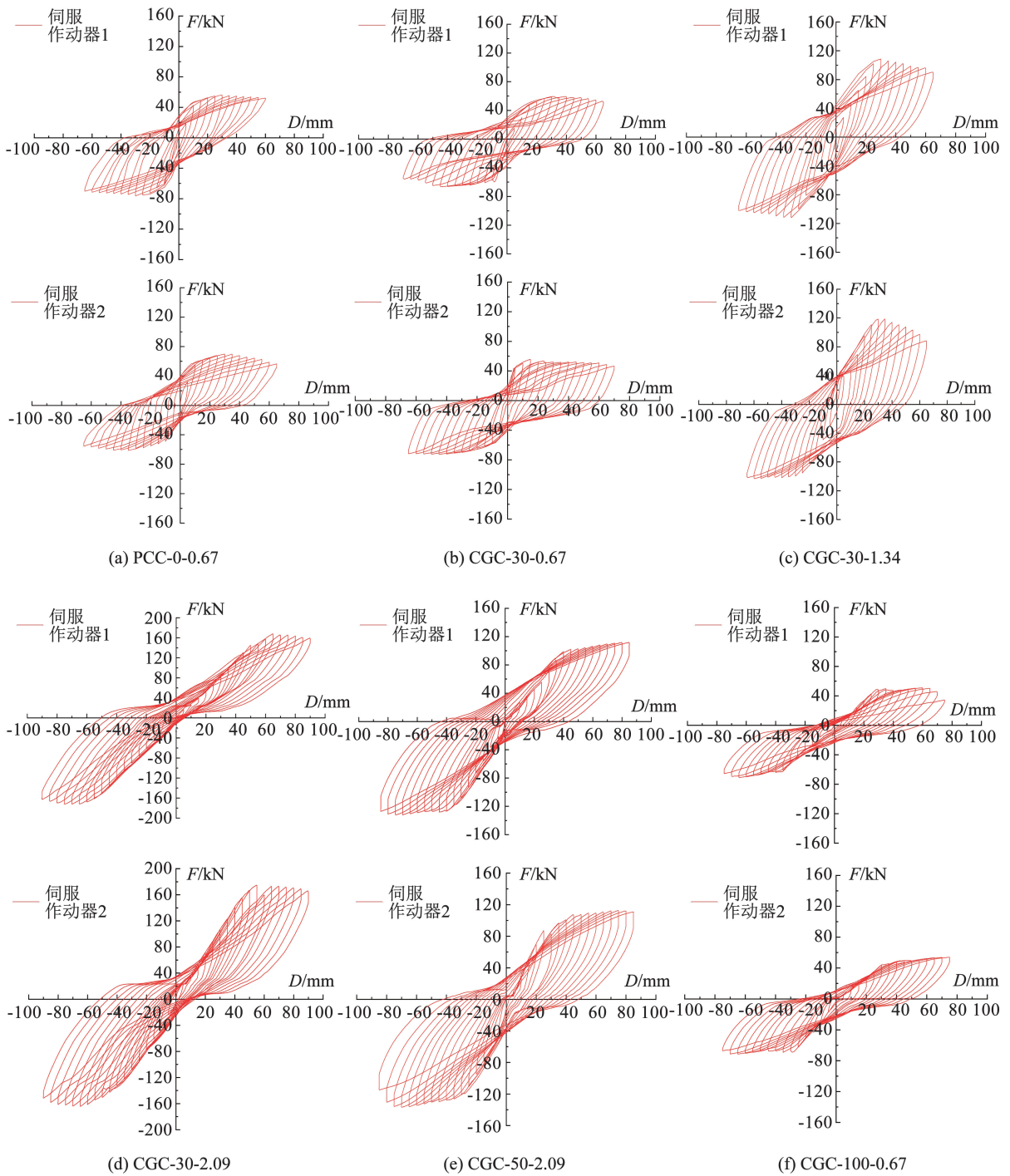


图 10 试件滞回曲线

Fig. 10 Hysteretic curves of specimens

### 2.3 骨架曲线

骨架曲线如图 11 所示,由于煤矸石混凝土的力学性能离散性更显著,正向加载产生的过大裂缝将

影响反向加载时的力学性能,煤矸石混凝土内部损伤的积累导致骨架曲线并不完全对称。

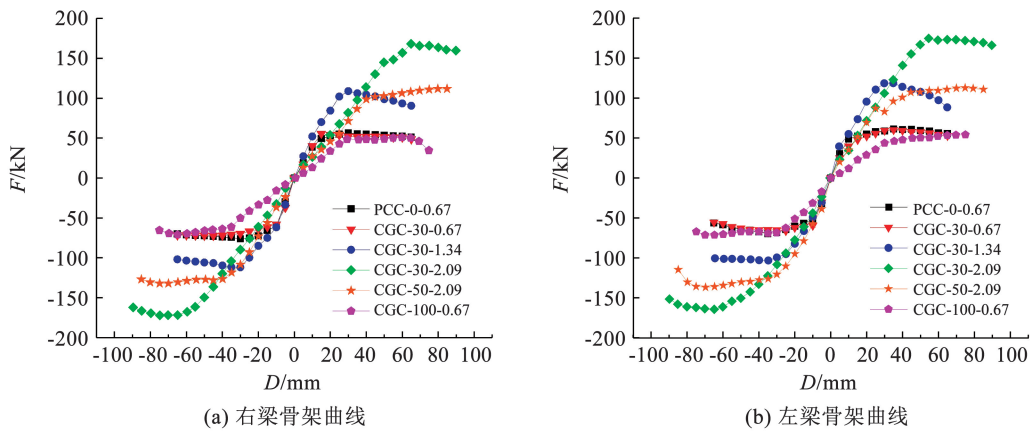


图 11 试件骨架曲线

Fig. 11 Skeleton curves of specimens

可通过能量法<sup>[21]</sup>求解屈服位移(图 12),在骨架曲线上找到点 A 使  $AOCA$  与  $ABEDA$  面积相等,即图中灰色区域  $S_1$  与  $S_2$  面积相等,过峰值荷载点做一条水平线,延长  $OA$  至  $D$  点,沿  $D$  点向下作垂线交骨架曲线于  $B$  点即为屈服点。

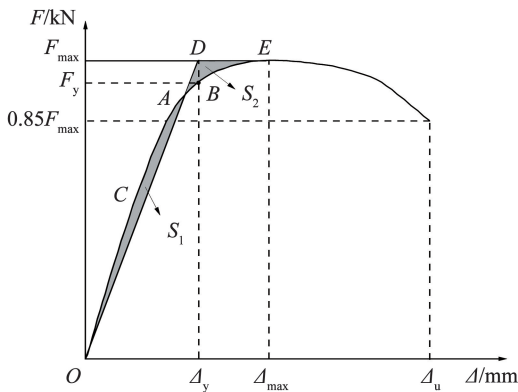


图 12 能量法求屈服位移

Fig. 12 Energy method for calculating yield displacements

将各试件位移特征值列于表 5。对比 PCC-0-0.67、CGC-30-0.67 和 CGC-100-0.67 可以看出,煤矸石取代率从 0 分别增大至 30%、100% 时,峰值荷载均值分别降低了 3.5%、8.0%;煤矸石取代率从 0 增大至 30% 时,延性系数变化不明显,而煤矸石取代率增大至 100% 时,延性系数均值降低了 53%。煤矸石取代率提高将增大煤矸石粗骨料相邻的概率,混凝土内部形成易损薄弱带,导致混凝土峰后脆性加剧。因此,高取代率煤矸石混凝土不适用于梁柱节点关键部位。对比 CGC-30-0.67、CGC-30-1.34 和 CGC-30-2.09 可以看出,配筋率从 0.67% 分别增大至 1.34%、2.09% 时,峰值荷载均值分别增加了 72.5%、165.9%,延性系数均值却降低了 41.7%、66.7%。结合试件的破坏形态和滞回曲线综合分析,增大配筋率虽然改善了梁端塑性铰混凝土的剥落,提高了承载力,但过高的配筋率将显著增大传入节点的剪力,诱发节点剪切破坏(CGC-30-2.09),从而未实现“强节点”抗震设计目标。

表 5 骨架曲线特征值

Tab. 5 Skeleton curve eigenvalue

节点编号	加载方向	开裂		屈服		峰值		破坏		延性系数 $\mu = \Delta_u / \Delta_y$
		位移 $\Delta_{cr} / \text{mm}$	荷载 $F / \text{kN}$	位移 $\Delta_y / \text{mm}$	荷载 $F / \text{kN}$	位移 $\Delta_{max} / \text{mm}$	荷载 $F / \text{kN}$	位移 $\Delta_u / \text{mm}$	荷载 $F / \text{kN}$	
PCC-0-0.67	正向	2.15	10.50	16.28	50.61	30	56.38	65	51.00	3.99
	负向	1.92	19.39	15.21	65.97	30	76.26	65	72.15	4.27
CGC-30-0.67	正向	2.09	7.78	12.93	53.18	15	55.46	65	48.55	5.03
	负向	1.65	20.04	15.87	62.07	40	72.49	65	71.80	4.10
CGC-30-1.34	正向	3.89	26.15	24.15	98.99	30	108.74	61	92.43	2.53
	负向	3.84	32.08	23.29	94.77	30	111.95	65	101.93	2.79
CGC-30-2.09	正向	4.36	21.77	60.84	158.66	65	168.12	90	159.50	1.48
	负向	4.17	20.82	57.70	164.99	75	172.13	90	162.25	1.56
CGC-50-2.09	正向	4.61	20.97	49.55	102.66	80	111.75	85	111.68	1.72
	负向	4.07	18.15	38.15	123.76	75	132.14	85	127.03	2.23
CGC-100-0.67	正向	4.66	8.08	34.05	48.19	60	50.90	75	34.47	2.20
	负向	4.22	5.44	44.52	64.84	65	71.11	75	65.56	1.68

注:位移荷载值取自右梁伺服作动器 1,向下加载为正;屈服位移采用等能量法确定。

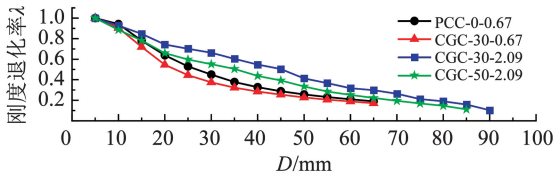
### 2.4 刚度退化

试件在往复荷载作用下存在刚度退化特性,刚度的退化由割线刚度  $K_i$  反映,割线刚度  $K_i$  为

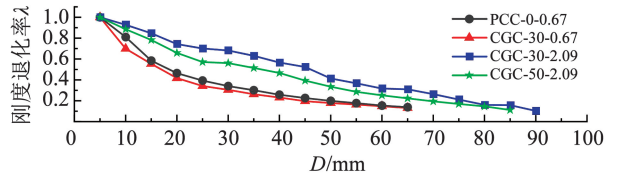
$$K_i = \frac{|+F_i| + |-F_i|}{|+X_i| + |-X_i|} \quad (1)$$

式中: $K_i$ 为第  $i$  级循环时的割线刚度,  $+F_i$  和  $-F_i$  分别为第  $i$  级循环时正、反向加载的荷载最大值,  $+X_i$  和  $-X_i$  分别为第  $i$  级循环时正、反向加载的荷载最大值所对应的位移值。为便于比较,进行归一化处理,引入刚度退化率:

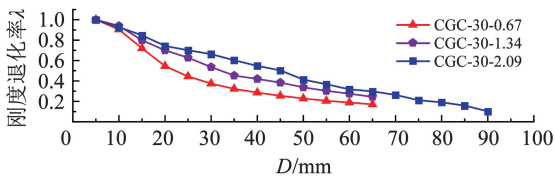
$$\lambda = \frac{K_i}{K_1} \quad (2)$$



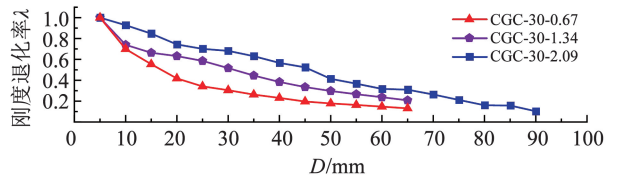
(a) 右梁煤矸石取代率影响的刚度退化率



(b) 左梁煤矸石取代率影响的刚度退化率



(c) 右梁纵筋配筋率影响的刚度退化率



(d) 左梁纵筋配筋率影响的刚度退化率

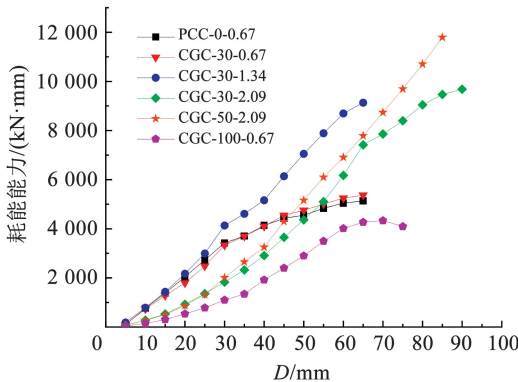
图 13 刚度退化率

Fig. 13 Stiffness deterioration ratio

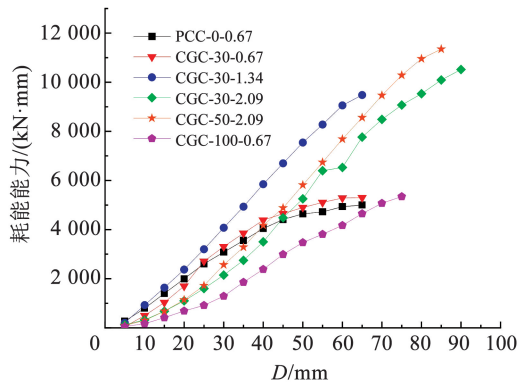
### 2.5 耗能能力

滞回曲线所围成的面积就是结构在该次循环加载中所消耗的能量,将每一次循环加载的滞回环面积相加,可以得到结构在整体受力过程中的累计耗能,累计耗能曲线见图 14。对比 PCC-0-0.67、CGC-30-0.67 和 CGC-100-0.67 可以看出,较少煤矸石的加入对梁柱节点的耗能能力影响不显著,低取代率(30%)煤矸石混凝土由于整体材料性能较好,裂缝的形成和扩展受到的影响有限,耗能能力能够较好

地维持,但高煤矸石取代率试件 CGC-100-0.67 较 PCC-0-0.67 耗能能力显著降低。对比 CGC-30-0.67、CGC-30-1.34 和 CGC-30-2.09 (剪切破坏)可以看出,相同加载位移下,CGC-30-1.34 的耗能能力最好,适当增大梁纵筋配筋率,可提高节点承载力,使节点能吸收更多的能量,但过高的配筋率将影响梁端塑性铰的转动,从而不能充分发挥钢筋屈服后的耗能能力,过高的配筋率还会导致传入节点的剪力增大,诱发节点剪切破坏,塑性变形能力、耗能能力降低。



(a) 右梁耗能曲线



(b) 左梁耗能曲线

图 14 累计耗能曲线

Fig. 14 Cumulative energy dissipation curves

试件的总耗能值为每级荷载下试件耗散能力的总和,总耗能值的统计结果如表 6 所示。对比 PCC-0-0.67、CGC-30-0.67 和 CGC-100-0.67 可以看出,30% 煤矸石取代率对总耗能影响不显著,100% 煤矸石取代率的总耗能降低了 22%。对比 CGC-30-2.09 和 CGC-50-2.09 可以看出,CGC-50-2.09 总耗能降低了 15.5%。对比 CGC-30-0.67、CGC-30-1.34 和 CGC-30-2.09 可以看出,适当增大梁纵筋配筋率可以提高节点的耗能能力,但配筋率过大会导致节点的耗能能力降低。

表 6 试件实测耗能能力 kN·mm

Tab. 6 Measured energy dissipation capacity of specimens

节点编号	右梁总耗能 $E_p$	左梁总耗能 $E_p$
PCC-0-0.67	42 274.85	41 450.33
CGC-30-0.67	42 481.50	42 782.16
CGC-30-1.34	60 387.09	64 254.50
CGC-30-2.09	42 642.66	47 639.85
CGC-50-2.09	36 945.19	41 220.72
CGC-100-0.67	31 683.77	37 281.61

等效黏滞阻尼系数具体的计算方法为

$$\xi_{eq} = \frac{S_{AFCEA}}{2\pi(S_{OAB} + S_{OCD})} \quad (3)$$

式中: $S_{AFCEA}$  为滞回环包围的面积, $S_{OAB} + S_{OCD}$  为假想的弹性直线(AC)在相同位移时包围的面积,示意图如图 15。

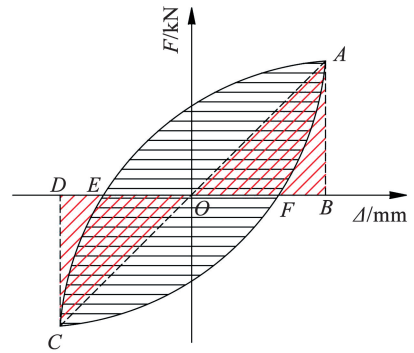
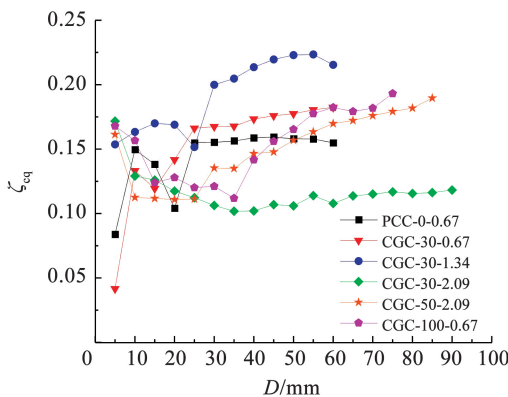


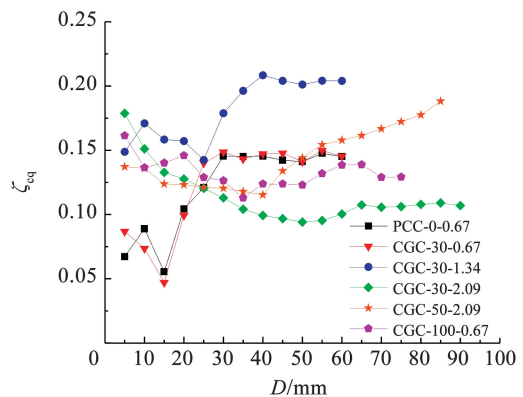
图 15 滞回曲线耗能能力计算示意

Fig. 15 Schematic for calculating energy dissipation capacity from hysteretic curves

等效黏滞系数如图 16 所示。等效黏滞阻尼系数在加载初期变化幅度大,随着荷载的增大,等效黏滞阻尼系数有小幅度增长,但当位移荷载加载至屈服荷载时,由于滞回曲线捏缩效应的增强,等效黏滞阻尼系数突然减小,当位移荷载位于屈服荷载和峰值荷载之间时,等效黏滞阻尼系数略有增长,超过峰值荷载后等效黏滞阻尼系数趋于平稳。进一步对比 CGC-30-0.67、CGC-30-1.34、CGC-30-2.09 可以看出,适当增大配筋率等效黏滞阻尼系数有所增大,但配筋率过大会导致等效黏滞阻尼系数减小。对比 PCC-0-0.67、CGC-30-0.67 和 CGC-100-0.67 可以看出,由于低煤矸石取代率试件材料均匀性、整体性较好,裂缝的形成和扩展与普通混凝土相似,等效黏滞系数与普通混凝土相差较小,耗能能力能够较好地维持。100% 煤矸石取代率的等效黏滞系数下降明显。



(a) 右梁等效黏滞阻尼系数



(b) 左梁等效黏滞阻尼系数

图 16 等效黏滞阻尼系数

Fig. 16 Equivalent viscous damping coefficient

## 2.6 梁纵筋应变

纵向钢筋应变突然增大时表明在此监测通道附近混凝土发生开裂。数据采集系统中时间轴同步,相同时刻梁端伺服作动器的反力即为开裂荷载。图 17 为加载过程中纵筋应变曲线。梁柱交界位置

梁纵筋表现出较高的拉应力,在试验初期,梁纵筋处于一端受压、一端受拉的状态,随着位移荷载的增加,梁纵筋拉应变逐渐增大,受压侧的压应力逐渐减小,越来越多的梁纵筋变成受拉状态,后期由于混凝土的剥落,应变片逐渐失效。

钢筋与混凝土之间的黏结性能,可通过单位长度上钢筋的应变斜率体现<sup>[22-23]</sup>。对比 PCC-0-0.67、CGC-30-0.67 和 CGC-100-0.67 上部钢筋梁柱界面处应变可以看出,CGC-100-0.67 钢筋应变变化率小,屈服后黏结滑移严重,高煤矸石取代率的梁的混凝土剥落得更多,导致梁纵筋与混凝土之间的黏结状况变差。

钢筋屈服后有不同程度的黏结退化现象,随着荷载正向、负向加载的变化,黏结应力方向也会变化,屈服区向节点的渗透交替进行,节点两端应变差也在逐渐变小,贯穿段的黏结性能将持续退化,受拉端附近黏结退化程度最严重。当试件进入破坏阶段,大部分应变片数值变为正数,表明钢筋被拉长,产生了残余拉应变。

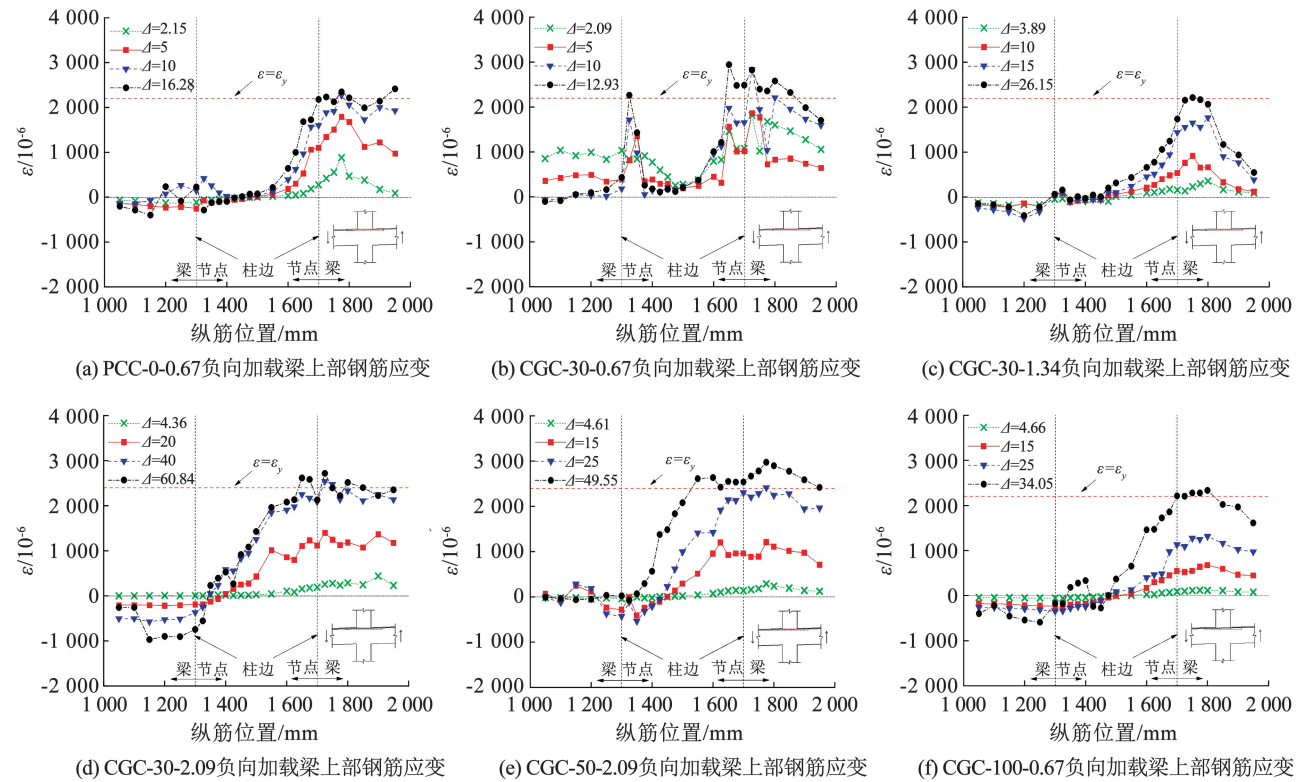


图 17 梁纵筋钢筋应变

Fig. 17 Steel strain of longitudinal reinforcement of beam

### 3 结论

1) 在低周往复荷载作用下,掺入煤矸石后对钢筋混凝土梁柱节点的破坏模式影响较小,而由于煤矸石轻质多孔承载力弱的特性,煤矸石混凝土梁柱节点破坏较普通混凝土的破坏程度严重;适当增大梁纵筋配筋率可以促成梁端裂缝多而密的分布形式,抑制裂缝的扩展,改善煤矸石混凝土的剥落现象。

2) 低配筋率下,100%煤矸石取代率的节点较普通混凝土节点承载力降低了 8.01%,高配筋率条件下,50%煤矸石取代率较 30%煤矸石取代率承载力降低了 28.8%。相同煤矸石取代率的节点,高配筋率较低配筋率的承载力提高了 165.9%,梁纵筋配筋率高的试件极限承载力更大,适当增大配筋率可以增强节点的强度和刚度。

3) 低取代率煤矸石混凝土梁柱节点对耗能能力的影响较小,100%取代率煤矸石混凝土梁柱节点

耗能降低了 22%;适当增大梁纵筋配筋率可以提高节点的耗能能力,但配筋率过大会导致传入节点剪力增大,诱发剪切破坏,节点的耗能能力反而降低。

4) 钢筋屈服后钢筋屈服点向节点区延伸,节点两侧钢筋应变差减小,上、下部钢筋最大的拉应变均出现在节点区附近,破坏阶段节点附近纵筋会塑性伸长;往复荷载作用下混凝土剥落严重,高取代率煤矸石混凝土不适用于节点关键部位。

### 参考文献

- [1] ZHU Mengyu, QIU Jisheng, CHEN Jixi. Effect and mechanism of coal gangue concrete modification by basalt fiber [J]. Construction and Building Materials, 2022, 328: 126601. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2022.126601
- [2] ZHANG Ni, ZHAO Zhongwei, ZHENG Chenyang. Compression behavior of GFRP-coal gangue concrete-steel tubular columns [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2022, 197: 104650. DOI:10.1016/j.ijpvp.2022.104650

- [3] CHEN Peiyuan, ZHANG Liheng, WANG Yonghui, et al. Environmentally friendly utilization of coal gangue as aggregates for shotcrete used in the construction of coal mine tunnel [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2021, 15: e00751. DOI: 10.1016/j.cscm.2021.e00751
- [4] MA Hongqiang, ZHU Hongguang, WU Chao, et al. Study on compressive strength and durability of alkali-activated coal gangue-slag concrete and its mechanism [J]. *Powder Technology*, 2020, 368: 112. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.04.054
- [5] YU Linli, XIA Junwu, XIA Ze, et al. Study on the mechanical behavior and micro-mechanism of concrete with coal gangue fine and coarse aggregate [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 338: 127626. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127626
- [6] 赵卫平, 陈明亮, 张国炜, 等. 钢管煤矸石混凝土轴心受压承载能力 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2024, 56(10): 24  
ZHAO Weiping, CHEN Mingliang, ZHANG Guowei, et al. Axial compression bearing capacity of coal gangue concrete filled steel tubes [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2024, 56(10): 24. DOI: 10.11918/202307026
- [7] ZHU Yuanyuan, ZHU Yingcan, WANG Aiguo, et al. Valorization of calcined coal gangue as coarse aggregate in concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2021, 121: 104057. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104057
- [8] GAO Shan, ZHAO Guohao, GUO Lanhui, et al. Utilization of coal gangue as coarse aggregates in structural concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 268: 121212. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121212
- [9] LI Gaonian, WANG Baomin, ZHOU Mei. Study on flexural properties of reinforced spontaneous combustion gangue concrete beams [J]. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 2018, 62(1): 206. DOI: 10.3311/PPci.10647
- [10] 张殿惠, 罗启华, 刘德清. 低周反复荷载作用下钢筋煤矸石混凝土上框架中柱节点抗震性能的试验研究 [J]. *沈阳建筑工程学院学报*, 1987(4): 20  
ZHANG Dianhui, LUO Qihua, LIU Deqing. Experimental study on the seismic performance of column joints in reinforced coal stone concrete frame under low cycle cyclic loading [J]. *Journal of Shenyang Institute of Architecture and Engineering*, 1987(4): 20
- [11] BAI Guoliang, GU Yu, LIU Hanqin. Experimental study on seismic behavior of gangue concrete frame middle joints with different gangue aggregate replacement rates [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1904(1): 012003. DOI: 10.1088/1742-6596/1904/1/012003
- [12] 赵卫平, 程倩倩, 李雪菡, 等. HRB400E 钢筋混凝土梁柱边节点的抗剪性能 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2022, 54(10): 20  
ZHAO Weiping, CHENG Qianqian, LI Xuehan, et al. Shearing performance of concrete exterior beam-column joints with HRB400E reinforcement [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2022, 54(10): 20. DOI: 10.11918/202111052
- [13] 周兴高. 全自燃煤矸石砼在高层框架结构住宅楼中的应用 [J]. *建筑砌块与砌块建筑*, 1997(1): 22  
ZHOU Xinggao. The application of fully self igniting coal and alkali in high-rise frame structure residential buildings [J]. *Building Blocks and Block Building*, 1997(1): 22
- [14] WANG Qinghe, LI Zhe, ZHANG Yuzhuo, et al. Influence of coarse coal gangue aggregates on elastic modulus and drying shrinkage behaviour of concrete [J]. *Journal of Building Engineering*, 2020, 32: 101748. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101748
- [15] ZHOU Mei, DOU Yanwei, ZHANG Yuzhuo, et al. Effects of the variety and content of coal gangue coarse aggregate on the mechanical properties of concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 220: 386. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.176
- [16] LIU Hanqing, BAI Guoliang, YAN Fang, et al. Effects of coal gangue coarse aggregate on seismic behavior of columns under cyclic loading [J]. *Buildings*, 2022, 12: 1170. DOI: 10.3390/buildings12081170
- [17] FENG Jian, WANG Shuo, MELONI M, et al. Seismic behavior of RC beam column joints with 600 MPa high strength steel bars [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(13): 4684. DOI: 10.3390/app10134684
- [18] ZHANG Xiaowei, RONG Xian, SHI Xiaona, et al. Experimental evaluation on the seismic performance of high-strength reinforcement beam-column joints with different parameters [J]. *Structures*, 2023, 51: 1591. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.03.100
- [19] 赵卫平, 李雪菡, 龙彬, 等. 钢筋混凝土梁柱边节点滞回性能数值模拟 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2024, 56(2): 37  
ZHAO Weiping, LI Xuehan, LONG Bin, et al. Numerical simulation of the hysteretic performance of exterior reinforced concrete beam-column joints [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2024, 56(2): 37. DOI: 10.11918/202211015
- [20] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997: 10  
Chinese Academy of Building Research. Specification for seismic test of buildings: JGJ/T 101—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997: 10
- [21] LI Dawang, REN Wei, XING Feng. Influence of non-uniform corrosion of steel bars on the seismic behavior of reinforced concrete columns [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 167: 20. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.149
- [22] ZHAO Weiping, ZHU Binrong. Basic parameters test and 3D modeling of bond between high-strength concrete and ribbed steel bar after elevated temperatures [J]. *Structural Concrete*, 2017, 18(5): 653. DOI: 10.1002/suco.201600005
- [23] ZHAO Weiping, ZHU Binrong. Theoretical model for the bond-slip relationship between ribbed steel bars and confined concrete [J]. *Structural Concrete*, 2018, 19(2): 548. DOI: 10.1002/suco.201700008

(编辑 刘 彤)