

# 钢桁架约束高强轻骨料混凝土空心柱抗震性能研究\*

刘田田<sup>1</sup>, 牛建刚<sup>1,2</sup>, 刘小立<sup>1</sup>

(1. 内蒙古科技大学 土木工程学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 内蒙古建筑职业技术学院 建筑工程与测绘学院, 内蒙古 呼和浩特 010020)

**摘要:**为探究地震影响下钢桁架约束高强轻骨料混凝土空心柱的抗震性能,采用低周往复荷载试验研究了轴压比、角钢含钢率、角钢形式及缀板宽度对试验柱抗震性能的影响规律。结果表明:轴压比增大能有效提升试件承载力及初始刚度,减小其刚度退化速率。轴压比为0.55时,试件滞回环面积最大,抗震性能最优;增大角钢含钢率能显著提升累积耗能,但对位移延性系数与刚度退化无明显影响,总体上对抗震性能影响较小;等肢角钢试件滞回环面积、峰值荷载、位移延性系数与累积耗能均高于不等肢角钢试件,采用等肢角钢的试件具有更好的抗震性能与变形能力;随缀板宽度增大,试件滞回环面积与位移延性系数增大,耗能能力小幅提升,刚度退化减缓,缀板宽度较大的试件抗震性能更优。

**关键词:**钢桁架;轻骨料混凝土;空心柱;抗震性能

中图分类号:TU398 文献标识码:A

文章编号:2095-2295(2026)01-0061-08

DOI:10.16559/j.cnki.2095-2295.2026.01.008

## Research on seismic performance of steel joist restrained high-strength lightweight aggregate concrete hollow columns

LIU Tiantian<sup>1</sup>, NIU Jiangan<sup>1,2</sup>, LIU Xiaoli<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China; 2. School of Architectural Engineering and Surveying, Inner Mongolia Architectural Vocational and Technical College, Hohhot 010020, China)

**Abstract:** In order to investigate the seismic performance of steel joist restrained high-strength lightweight aggregate concrete hollow core columns under the influence of earthquakes, the low circumferential reciprocating load tests were used to investigate the effects of axial compression ratio, steel content of angle, angle form and width of splice plate on the seismic performance of the test columns. The results show that increasing the axial compression ratio can effectively improve the load carrying capacity and initial stiffness of the specimen and reduce its stiffness degradation rate. When the axial compression ratio is 0.55, the hysteresis loop area of the specimen is the largest and the seismic performance is the best; Increasing the steel content of the angles significantly improves the cumulative energy dissipation, but has no significant effect on the displacement ductility coefficient and stiffness degradation, and in general has a small effect on the seismic performance; The hysteresis loop area, peak load, displacement ductility coefficient and cumulative energy dissipation of the equal-limbed angle specimens are higher than those of the unequal-limbed angle specimens, and the specimens with equal-limbed angles have better seismic performance and deformation capacity; As the width of the splice plate increases, the hysteresis loop area and displacement ductility coefficient of the specimen increase, the energy dissipation capacity increases slightly, the stiffness degradation slows down, and the seismic performance of the specimen with larger splice plate width is better.

**Key words:** steel joist; lightweight aggregate concrete; hollow column; seismic performance

\* 基金项目:国家自然科学基金(51968058);内蒙古自治区自然科学基金(2021MS05012)。

作者简介:刘田田,女,硕士研究生。

通信作者:牛建刚,男,教授,E-mail:niujiangang@imust.edu.cn

收稿日期:2025-01-16

地震的突发性和不可预测性给我国建筑结构带来极大损伤与危害,空心结构<sup>[1-3]</sup>与高强轻骨料混凝土的应用<sup>[4-5]</sup>可在满足强度与刚度的前提下大幅减轻结构自重,提升结构抗震性能。但高强轻骨料混凝土延性较差,众多学者针对如何改善其脆性属性进行了研究。KEVINLY 等<sup>[6]</sup>对纤维轻骨料混凝土单向板的受弯性能进行研究发现加入钢纤维能有效避免轻骨料混凝土结构发生过早弯曲-压缩破坏。刘喜等<sup>[7]</sup>、王怀亮<sup>[8]</sup>、叶艳霞等<sup>[8]</sup>、王海涛等<sup>[9]</sup>从不同角度对钢纤维高强轻骨料混凝土进行研究发现掺入钢纤维能有效抑制高强轻骨料混凝土裂缝发展,改善其力学性能与延性。但现有研究主要集中于钢纤维高强轻骨料混凝土结构的抗弯性能与轴压性能,无法反映出钢纤维高强轻骨料混凝土能否应用于抗震设防区建筑及其在地震影响下的性能优劣。

与钢筋骨架相比,钢桁架具有更强的约束作用且便于施工<sup>[12-14]</sup>。众多学者<sup>[15-19]</sup>将钢桁架应用于空心柱中进行研究发现:钢桁架能有效提升混凝土柱承载力及变形能力;轴压比、缀板宽度、角钢规格等关键因素对其承载力、耗能能力及延性影响显著。但现有研究主要针对普通混凝土,而普通混凝土自重较大,无法充分发挥空心结构通过减轻结构自重从而提升结构抗震性能的优势。

因此将钢纤维高强轻骨料混凝土、钢桁架与空心结构相结合,对钢桁架约束高强轻骨料混凝土空心柱抗震性能展开研究。以确定关键参数(轴压比、角钢含钢率、角钢形式和缀板宽度)变化对其抗震性能的影响为目的,为钢桁架约束高强轻骨料混凝土空心柱抗震性能未来进一步研究与在工程中进行抗震构件设计提供参考。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

以轴压比、角钢含钢率、角钢形式以及缀板宽度为变量共设计9根试验柱,试件编号设为SCX,X为试件序号,具体参数见表1。试件截面形式为外方内圆,空心率(按截面面积占比计算)为25%,柱身截面尺寸为250 mm × 250 mm,保护层厚度为20 mm,试验段高度为1 000 mm。角钢和缀板均采用Q235钢,钢板厚4 mm,试件相邻缀板间距为150 mm。试件构造见图1。在加载高度内进行缀板加密,并外包CFRP布以避免试件上端在加载中过早破坏。

表1 试件设计

Table 1 Specimen design

试件编号	轴压比	角钢规格	角钢含钢率	缀板宽度/mm
SC1	0.40	∠30 X 4	1.45%	20
SC2	0.55	∠30 X 4	1.45%	20
SC3	0.65	∠30 X 4	1.45%	20
SC4	0.55	∠36 X 4	1.76%	20
SC5	0.55	∠40 X 4	1.97%	20
SC6	0.55	∠40 X 25 X 4	1.79%	20
SC7	0.55	∠45 X 28 X 4	2.02%	20
SC8	0.55	∠30 X 4	1.45%	15
SC9	0.55	∠30 X 4	1.45%	30

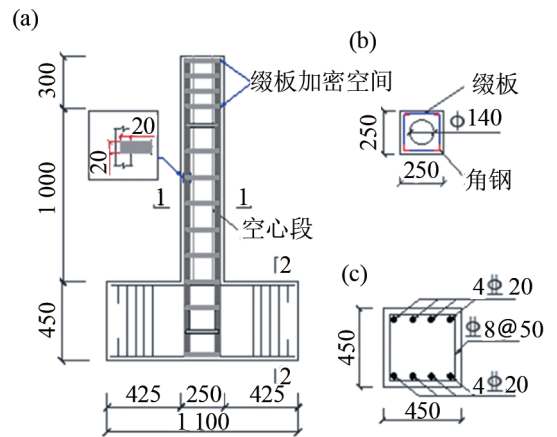


图1 试件尺寸详图

Fig. 1 Detailed drawing of specimen

(a) 立面图;(b) 1-1 剖面图;(c) 2-2 剖面图。

### 1.2 材料性能

混凝土强度等级为LC50,配合比见表2。钢纤维采用直径为0.3 mm,长度为10~13 mm,抗拉强度为1 080~1 200 MPa的镀铜型端钩钢纤维,掺入0.5%钢纤维后,28 d立方体抗压强度平均值为55.0 MPa。制作钢桁架的角钢和缀板均采用同一批Q235普通碳素钢,钢材性能参数见表3。

表2 混凝土配合比

Table 2 Mix proportion of concrete

kg · m<sup>-3</sup>

强度	陶粒	砂	水泥	粉煤灰	硅灰	水	减水剂
LC50	550	550	550	120	50	180	17

表3 Q235 普通碳素钢材性

Table 3 Properties of Q235 ordinary carbon steel

$f_y$ /MPa	$\epsilon_y$ /( $\times 10^{-6}$ )	$f_u$ /MPa	$E_s$ /MPa
334.5	1 780	442.9	$1.88 \times 10^5$

### 1.3 试验装置及加载

试验在内蒙古科技大学实验室进行,依据《建筑抗震试验方法规程》(JGJ/T 101—2015)进行加载,低周反复荷载由位移控制,以1 mm为级差进行加载直至试件屈服(以荷载位移曲线出现明显拐点判定),之后以屈服位移  $\Delta_y$  的倍数进行循环加载,每级循环3次,直至试件承载力下降至峰值承载力的85%,停止加载。试验加载装置见图2。

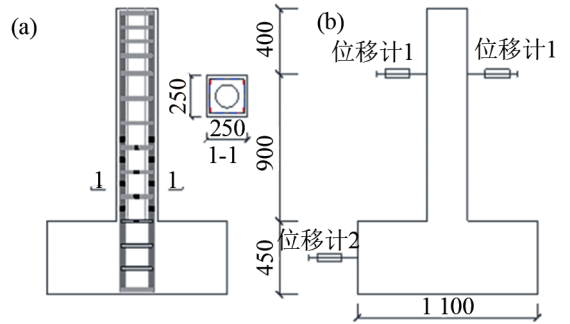


图3 测点布置

Fig. 3 Layout of measuring points

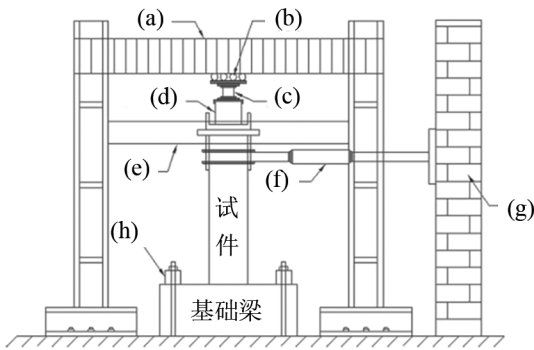
(a)应变片布置图;(b)位移计布置图。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 破坏现象观测结果

破坏现象如图4所示,各试件破坏现象共同点如下:当水平位移加载至7 mm时于线孔周边出现裂缝,随加载位移增大,裂缝沿柱两侧角钢斜向下45°向柱中心缓慢延伸,其原因是角钢截面易产生应力集中,角钢变形较大导致其与混凝土间发生滑移,柱两侧混凝土变形大于柱中部混凝土;至2.5 $\Delta_y$ 后,柱根角钢和基础底部间裂缝逐渐增大,斜裂缝变宽,东西两侧出现横向裂缝;至3.5 $\Delta_y$ 后,东西两侧横向裂缝与南北两侧裂缝相互贯通,柱脚底部混凝土被压碎,由于钢纤维的桥接作用,柱脚底部未出现严重剥落;最终在4.25 $\Delta_y$  ~ 5.0 $\Delta_y$ 时柱根部角钢和缀板分离,纵向角钢被拉断,试件破坏。

由图4(a)~(c)知,随轴压比增大,试件斜裂缝发展速度加快且数目增多。轴压比为0.55时,试件破坏时的裂缝分布高度最大,柱根处破坏最严重,材料性能发挥最充分。由图4(b)~(e)知,试件SC4裂缝宽度、长度及分布范围最大,角钢含钢率为1.96%时,柱脚处剥落最严重。对比图4(d,f)与图4(e,g)知角钢形式的变化对试件破坏现象无明显影响。由图4(b,h,i)知,随缀板宽度增加,试件破坏时的极限位移逐渐增大,裂缝数目、长度及分布范围迅速增加,表明缀板较宽的钢桁架与混凝土的协



a-反力梁;b-反力梁;c-压力传感器;d-液压千斤顶;  
e-横梁;f-动作器;g-反力墙;h-地锚螺母

图2 试验加载装置

Fig. 2 Test loading device

### 1.4 测点布置

在柱顶加载点处两侧布置位移计1,在基础地梁位置布置位移计2,由相对测量值表示柱顶部加载点处水平位移。于柱根部0~450 mm范围内四周角钢与缀板作为测点位置粘贴应变片用于量测角钢及缀板应变。应变片及位移计布置如图3所示。

同作用更优。

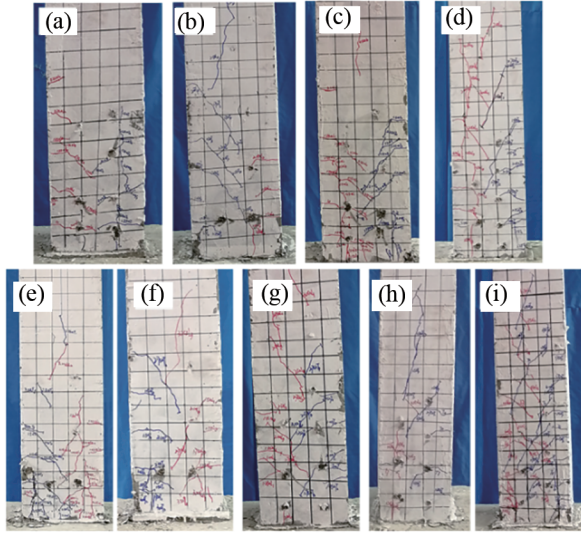


图4 试件裂缝分布图

Fig. 4 Crack Distribution of Specimen

(a) SC1; (b) SC2; (c) SC3; (d) SC4; (e) SC5; (f) SC6;  
(g) SC7; (h) SC8; (i) SC9。

## 2.2 滞回曲线试验结果

滞回曲线是刻画骨架曲线,研究结构塑性变形能力、耗能能力及刚度退化的基础。滞回曲线如图5所示。由图可知,试件滞回曲线均呈现出弓形,滞回环面积相对饱满,试件具有良好抗弯能力。

对比图5(a)~(c)可知:试件滞回环面积随轴压比增大呈先增后减的趋势。当轴压比为0.55时,滞回环面积最饱满,试件抗震性能最优。对比图5(b)~(e)可知:滞回曲线饱满程度随角钢含钢率增长而逐渐改善,峰值荷载后的下降段曲线斜率逐渐减缓。其原因是峰值荷载后,角钢与混凝土滑移增大以致角钢几乎单独承担弯矩作用,故增大角钢含钢率能有效减缓下降段曲线切线斜率,提升试件抗震性能。分别对比图5(d,f)与图5(e,g)可知:在角钢含钢率接近的情况下,与不等肢角钢试件相比,等肢角钢试件滞回环面积有明显增长,表明采用等肢角钢钢框架的试验柱具有更好的抗震性能与变形能力。对比图5(b,h,i)可知:随级板宽度增大,滞回曲线更加饱满,抗震性能提升。

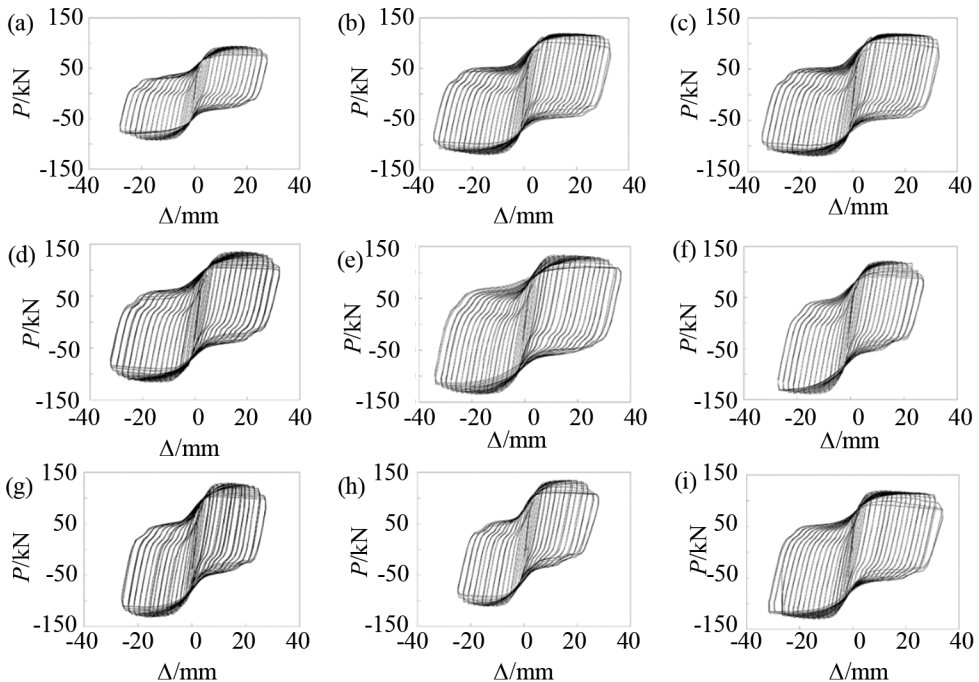


图5 滞回曲线

Fig. 5 Hysteresis curve

(a) SC1; (b) SC2; (c) SC3; (d) SC4; (e) SC5; (f) SC6; (g) SC7; (h) SC8; (i) SC9。

### 2.3 承载力及延性变形分析

试件在不同荷载作用下的首个滞回环峰值点的包络曲线即为该试件骨架曲线。骨架曲线能够全面反映结构承载能力和延性性能等关键指标。骨架曲线对比图如图 6 所示。各试件特征点荷载、位移及位移延性系数见表 4。由图 6(a) 知:试件 SC2、SC3 的峰值荷载较试件 SC1 分别提升 27.4% 与 45.4%, 表明增大轴压比可显著提升试件承载能力。SC1、SC2 及 SC3 的位移延性系数分别为 5.66、5.69 与 5.30, 试件 SC2 位移延性系数最大, 其原因是钢桁架能够承担较大的拉力, 而高强轻骨料混凝土则能够承受较大的压力。适当轴压比下, 结构处于较为稳定的受力状态。此时, 钢桁架和混凝土能够充分发挥各自的优点, 形成协同工作的整体, 从而提升其延性变形能力。

由图 6(b) 可知: 增大角钢含钢率可增大角钢截面与混凝土接触面积, 增强角钢与混凝土的协同作用从而提升试件峰值荷载, 但对试件初始刚度及极限位移无明显影响, 位移延性系数随角钢含钢率增

加呈减小趋势, 但幅度较小。由此可见, 角钢含钢率的增长能有效提升试件承载能力, 但对延性影响较小。

由图 6(c) 可知: 不同角钢形式下的试件骨架曲线基本重合, 但等肢角钢试件峰值荷载总是高于不等肢角钢试件。除此之外, SC4 极限位移高于 SC6; 峰值荷载后 SC7 刚度退化速率比 SC5 更快, 表明当角钢含钢率接近时, 等肢角钢试件的延性优于不等肢角钢试件。其原因是等肢角钢具有对称性, 更容易形成稳定的结构体系, 在受力时能够更均匀地分布荷载, 减少应力集中和不均匀变形的可能性, 从而能更好地抵抗变形和破坏, 提升试件延性。

由图 6(d) 可知: 试件 SC2、SC9 的位移延性系数较试件 SC8 分别提升了 33.8% 与 54.8%, 其原因是较宽的缀板与角钢接触面积较大, 增强了对角钢的约束作用从而使其不易发生局部屈曲与破坏, 同时较宽的缀板会增强钢桁架对于混凝土的约束作用, 有助于增强钢桁架与混凝土间的协同作用, 进而改善试件整体稳定性与变形能力。

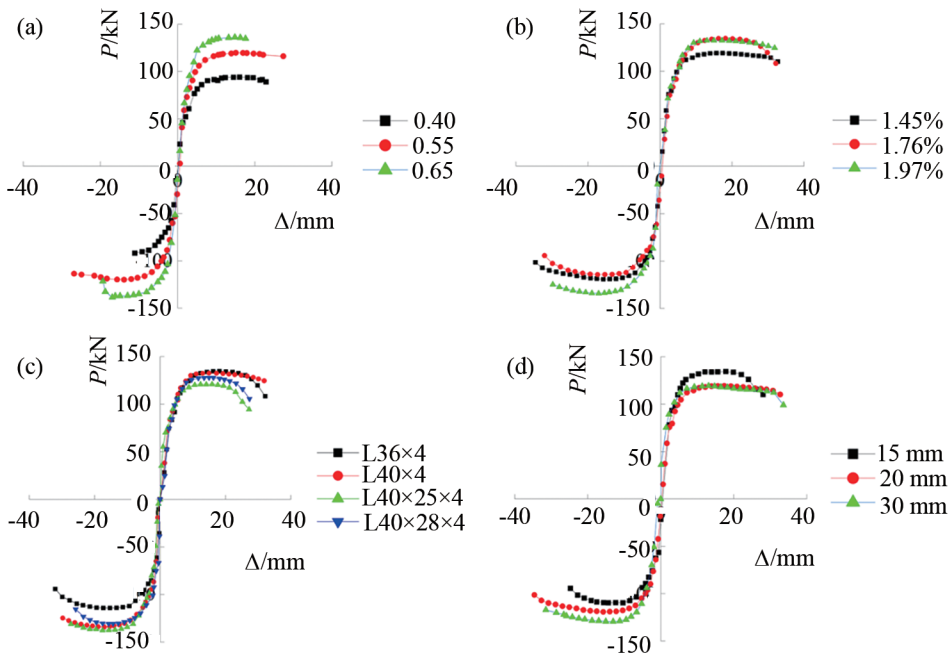


图 6 骨架曲线对比

Fig. 6 Comparison of skeleton curves

表4 试件骨架曲线的特征值和延性系数

Table 4 Characteristic values and ductility coefficients of the skeleton curves of specimens

试件编号	屈服点		峰值点		极限点		$\mu$
	$P_y/\text{kN}$	$\Delta_y/\text{mm}$	$P_m/\text{kN}$	$\Delta_m/\text{mm}$	$P_u/\text{kN}$	$\Delta_u/\text{mm}$	
SC1	78.40	4.76	93.65	14.57	79.61	26.92	5.66
SC2	100.25	5.74	119.32	16.57	105.83	32.67	5.69
SC3	118.73	4.65	136.18	15.91	117.37	24.64	5.30
SC4	105.55	5.74	124.50	17.76	105.83	31.11	5.42
SC5	114.70	5.69	133.43	16.01	124.74	30.80	5.41
SC6	108.37	5.23	129.40	16.75	117.01	26.22	5.02
SC7	110.71	4.98	129.40	15.34	112.15	25.80	5.18
SC8	110.34	5.98	122.05	16.09	104.41	25.39	4.25
SC9	102.65	4.45	124.39	13.08	109.27	32.30	7.25

注： $P_y$  为平均屈服荷载， $\Delta_y$  为平均屈服位移， $P_m$  为平均峰值荷载， $\Delta_m$  为平均峰值位移， $P_u$  为平均极限荷载， $\Delta_u$  为平均极限位移， $\mu$  为延性系数。

## 2.4 耗能分析

承重构件在地震作用下的耗能能力是衡量其抗震性能的关键指标，耗能能力优的构件可较好地实现“三水准”抗震设防目标。累积耗能可用于评估试件在低周往复荷载作用下的耗能能力，其计算图示如图7所示，计算公式见式(1)：

$$E = S_{ABC} + S_{CDA} \quad (1)$$

式中： $S_{ABC}$  及  $S_{CDA}$  分别为滞回环上、下半部面积。各试件累积耗能随位移变化曲线见图8。

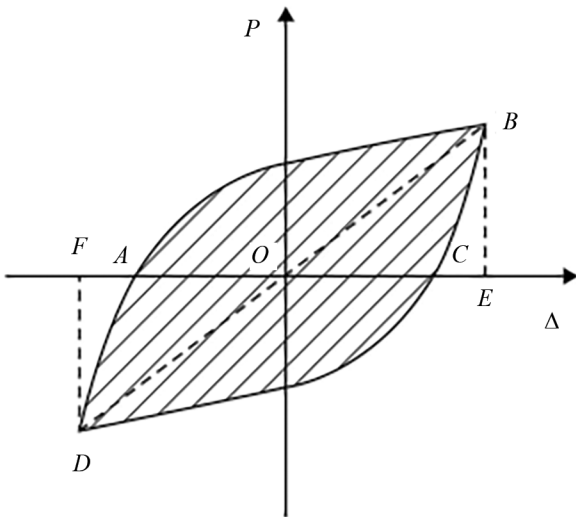


图7 累积耗能计算图示

Fig. 7 Diagram of cumulative energy dissipation calculation

由图8分析可知：当轴压比为0.55时，试件破坏时累积耗能最大，耗能能力最优。其原因是当轴压比为0.55时，钢桁架与高强轻骨料混凝土间的协同作用最好，可使试件在进入塑性和破坏阶段时充分发挥混凝土作用，提升其累积耗能能力。轴压比为0.40与0.65时试件累积耗能较低主要是由于低轴压比试件难以充分发挥高强轻骨料混凝土的抗压性能，导致试件因承载力不足而过早破坏；高轴压比限制了试件极限变形能力，导致试件因延性不足而过早发生破坏。

随角钢含钢率增大，试件在极限破坏状态的累积耗能逐渐增大。角钢含钢率相近时，等肢角钢试件破坏时的累积耗能优于不等肢角钢试件。随缀板宽度增长，试件在弹塑性和全塑性阶段的曲线斜率小幅增大，耗能能力小幅提升，但总体来说，各试件耗能曲线基本重合，缀板宽度的变化对累积耗能曲线影响较小。

## 2.5 刚度退化分析

刚度退化曲线能够直观反映结构在反复荷载作用下刚度随循环次数增加的变化情况，是评估结构抗震性能的重要指标。通过计算割线刚度可评估试件刚度退化情况，采用式(2)进行割线刚度计算：

$$K_i = \frac{|+p_i| + |-p_i|}{|+\Delta_i| + |-\Delta_i|} \quad (2)$$

式中: $K_i$  为第  $i$  次循环下的平均割线刚度;  $+P_i$  与  $-P_i$  分别为第  $i$  次循环下正向与反向的峰值荷载;  $+\Delta_i$  与  $-\Delta_i$  为第  $i$  次循环下正向与反向的峰值位移。不同参数变化下的刚度退化曲线如图 9 所示。

不断增大,较大的轴力限制了试件的变形能力,从而使试件在进入弹塑性阶段的刚度退化较小。在相同位移下,轴压比越大的试件抗侧刚度越高;角钢含钢率及角钢形式的变化对刚度退化曲线无明显影响;试件初始刚度随缀板宽度增大而逐渐增大。

由图 9 分析可知:随轴压比增大,试件初始刚度

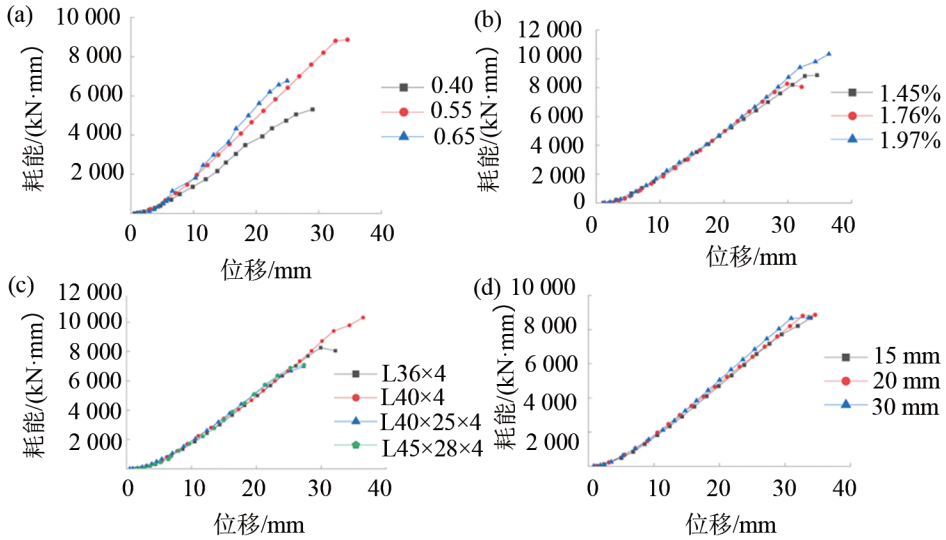


图 8 累积耗能曲线对比

Fig. 8 Comparison of cumulative energy dissipation curves

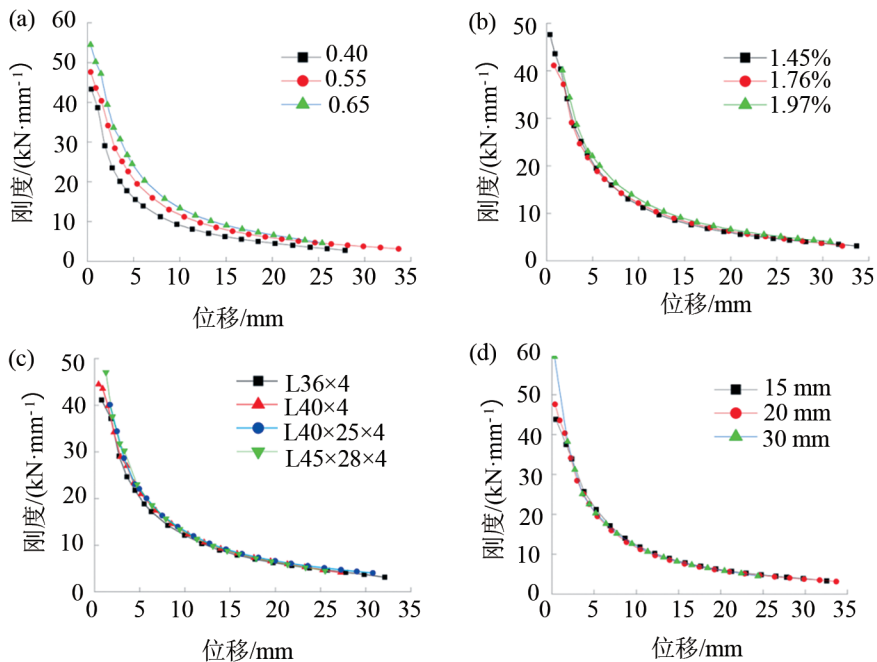


图 9 刚度退化曲线对比

Fig. 9 Comparison of stiffness degradation curves

### 3 结论

1) 随轴压比增大, 试件承载能力及初始刚度提升, 刚度退化速率减小。当轴压比为 0.55 时, 试验柱滞回环面积最大, 试件耗能能力及延性最优。表明一定范围内增大轴压比有助于增强钢桁架与混凝土之间的协同作用, 进而提升试件的整体抗震性能。

2) 随角钢含钢率增大, 试件滞回曲线饱满程度与峰值荷载有所提升但幅度较小, 显著提升了试件极限破坏状态时的累积耗能, 但对位移延性系数与刚度退化影响较小。总体来说, 角钢含钢率的增长对试件抗震性能的影响较小。

3) 等肢角钢试件滞回环面积、峰值荷载、位移延性系数与累积耗能均高于不等肢角钢试件, 但角钢形式的变化对刚度退化无明显影响。表明采用等肢角钢的试件具有更好的抗震性能与变形能力。

4) 缀板宽度增大增强了对角钢及混凝土的约束作用, 提升了试件整体稳定性及变形能力。随缀板宽度增大, 试件滞回环面积与位移延性系数增大, 耗能能力小幅提升, 刚度退化减缓。表明缀板宽度较大的试件抗震性能更优。

#### 参考文献:

[1] 沈聚敏, 刘竹青, 翁义军. 钢筋混凝土空心柱抗震性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 1982(5):21.

[2] 牛建刚, 边钰, 许尧. 塑钢纤维轻骨料混凝土空心柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(S2): 235.

[3] 相泽辉, 周杰, 牛建刚, 等. 塑钢纤维增韧轻骨料混凝土空心柱抗震性能试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2022, 30(3):579.

[4] 潘亮, 魏慧, 刘喜, 等. 高强轻骨料混凝土柱抗震性能研究进展[J]. 世界地震工程, 2016, 32(4):259.

[5] 吴涛, 刘喜, 魏慧. 高强轻骨料混凝土框架中节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(6):32.

[6] KEVINLY C, DU P, TEOH K B, et al. Experimental study and modelling of flexural behaviour of continuous fibre-reinforced lightweight aggregate concrete one-way slab at ambient and elevated temperatures[J]. Engineer-

ing Structures, 2024, 307:117924.

- [7] 刘喜, 吴涛, 杨雪, 等. 纤维增韧高强轻骨料混凝土力学性能与微观结构[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(5): 700.
- [8] 王怀亮. 钢纤维高性能轻骨料混凝土多轴强度和变形特性研究[J]. 工程力学, 2019, 36(8):122.
- [9] 叶艳霞, 王宗彬, 谢夫林, 等. 钢纤维增强高强轻骨料混凝土的力学性能[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(1): 63.
- [10] 王海涛, 王立成. 钢纤维高强轻骨料混凝土弯曲韧性与抗冲击性能[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(6): 1082.
- [11] MA H L, CUI C, LI X, et al. Study on mechanical properties of steel fiber reinforced autoclaved lightweight shell-aggregate concrete[J]. Materials & Design, 2013, 52:565.
- [12] 韩博文, 高华国, 尤季旺, 等. 内置不同角钢骨架的型钢混凝土梁受力性能研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(14):75.
- [13] 祁海啸, 万馨. 交叉 U 型板连接的墙梁节点抗震性能试验研究[J]. 内蒙古科技大学学报, 2023, 42(2): 155.
- [14] 郝林峰, 万馨, 刘一. 外肋板刚度对外肋板式组合剪力墙结构抗震性能影响研究[J]. 内蒙古科技大学学报, 2023, 42(1):46.
- [15] KIM C, HWANG H. Numerical investigation on load-carrying capacity of high-strength concrete-encased steel angle columns [J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2018, 12(1):1.
- [16] 唐兴荣, 何葆林. 空间钢构架混凝土框架结构抗震性能试验研究和设计建议[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(3):45.
- [17] 史庆轩, 盛广彦, 戎翀, 等. 钢桁架(ST)约束混凝土组合柱抗震性能研究[J]. 世界地震工程, 2020, 36(2): 62.
- [18] 相泽辉, 刘小立, 牛建刚. 不同空心率对高强轻质混凝土角钢组合空心柱抗震性能影响[J]. 内蒙古科技大学学报, 2022, 41(4):390&396.
- [19] 刘威亨. 钢纤维高强轻质混凝土角钢组合空心柱轴压性能研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2021.

(责任编辑: 张利萍)