

DOI: 10.3969/j.issn.2096-8248.2025.04.009

引用格式: 刘龙震, 唐兴荣. 空间钢构架混凝土梁斜截面抗剪性能试验研究[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2025, 34(4): 82-88.

空间钢构架混凝土梁斜截面抗剪性能试验研究

刘龙震, 唐兴荣

(苏州科技大学 土木工程学院, 江苏 苏州 215011)

摘要: 由角钢和缀条焊接而成的空间钢构架替代传统绑扎钢筋骨架形成空间钢构架混凝土结构构件。为进一步研究空间钢构架混凝土梁的斜截面抗剪性能, 以缀条间距、缀条宽度为设计参数, 按“强弯弱剪”原则设计5根空间钢构架混凝土简支梁试件, 进行集中荷载作用下空间钢构架混凝土梁斜截面抗剪性能试验研究, 并对各试件破坏现象、抗剪承载力等性能进行分析。试验结果表明: 在其他条件相同时, 减小缀条间距或增大缀条宽度对空间钢构架混凝土梁的变形性能提升较为显著; 在其他条件相同时, 空间钢构架混凝土梁的抗剪承载力随配箍特征值的增大呈线性增加趋势, 并具有更好的变形性能。

关键词: 空间钢构架混凝土; 简支梁; 抗剪性能

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

文章编号: 2096-8248(2025)04-0082-07

Experimental study on shear behavior of oblique section of concrete beam with spatial steel frame

LIU Longzhen, TANG Xingrong

(School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China)

Abstract: The spatial steel frame concrete structure members are formed by using the spatial steel frame made of angle steel and strips welding to replace the traditional binding steel frame. In order to further study the oblique section shear behavior of concrete beams with spatial steel frame, according to the principle of strong bending and weak shear, five specimens of concrete simply supported beams with spatial steel frame were designed by taking the spacing and width of the strips as the design parameters, and the shear behavior of the oblique section of the concrete beams with spatial steel frame was tested under concentrated load. The properties of the damage phenomenon and shear bearing capacity of each specimen were analyzed. The test results showed that when other conditions were the same, the deformation performance of the spatial steel frame concrete beam was significantly improved with the reduction of the strip spacing or the increase of the strip width when other conditions were the same, the shear capacity increased linearly with the increase of stirrup characteristic value, and the beam had better deformation performance.

Key words: spatial steel frame concrete; simply supported beams; shear behavior

目前, 工程上常用由角钢和缀条焊接而成的空间钢构架来替代钢筋混凝土结构构件中的传统绑扎

收稿日期: 2024-06-04; 修订日期: 2024-10-22

作者简介: 刘龙震, 硕士研究生, 研究方向为混凝土结构与组合结构及其应用, (E-mail) 1124304179@qq.com。

通信作者: 唐兴荣, 教授, 博士, 研究方向为混凝土结构与组合结构及其应用, (E-mail) tangxingrong01@163.com。

钢筋骨架形成空间钢构架混凝土结构构件。已有研究^[1-10]表明, 空间钢构架混凝土柱在轴向荷载作用下, 空间钢构架与核心混凝土接触面积得到较大提高, 这一特性有助于空间钢构架更好地约束内部的核心混凝土, 使混凝土三向受压, 从而提高核心混凝土的轴心抗压强度, 增强构件的抗剪和抗扭等的承载力, 极大地提高其塑性和韧性。文献^[11-13]对空腹式(桁架式) 钢骨混凝土梁的抗剪性能进行了试验研究和分析, 结果表明, 空腹式钢构架可以增强混凝土梁的抗剪性能。剪跨比和腹杆间距是影响空腹式钢骨混凝土梁抗剪承载力的关键因素。目前对空间钢构架混凝土梁抗剪性能的研究还很少^[14-15]。空间钢构架对核心混凝土的约束作用可以有效阻止混凝土内部斜裂缝扩展, 从而提高梁的斜截面抗剪承载力。因此开展对空间钢构架混凝土梁斜截面抗剪性能的研究有一定的必要性。本文在文献^[15]的基础上, 改变缀条间距或缀条宽度, 制作了 5 根空间钢构架混凝土简支梁试件, 进行集中荷载作用下空间钢构架混凝土梁斜截面抗剪性能试验研究, 并对各试件的破坏现象、抗剪承载力等性能进行分析。

1 试验概况

1.1 试件设计

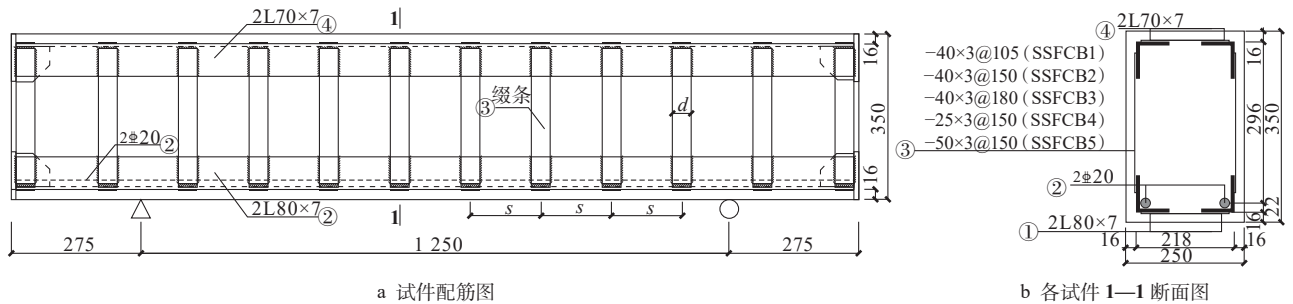
为进一步探究空间钢构架混凝土简支梁斜截面抗剪性能, 以配箍特征值为设计参数, 通过缀条间距或缀条宽度的变化实现配箍特征值的变化, 按“强弯弱剪”原则, 设计制作了 5 根空间钢构架混凝土梁试件(SSFCB1~SSFCB5)。其中 SSFCB1~SSFCB3 为一组对比试件, 通过改变缀条间距(105, 150, 180 mm) 研究不同配箍特征值(λ_v) 对构件抗剪性能的影响; SSFCB4, SSFCB2 和 SSFCB5 为一组对比试件, 通过改变缀条宽度(25, 40, 50 mm) 研究不同配箍特征值(λ_v) 对构件抗剪性能的影响。各试件设计截面尺寸($b \times h$) 均为 250 mm \times 350 mm, 梁长均为 1 800 mm, 计算剪跨比 $\lambda=2.01$ 。试件设计混凝土强度等级为 C30。角钢(L70 \times 7, L80 \times 7) 和缀条(-25 \times 3, -40 \times 3, -50 \times 3) 采用 Q235 钢, 附加纵向受拉钢筋选用 2 根直径 20 mm 的 HRB400 钢。考虑到试验梁, 设计时取试件角钢的保护层厚度为 16 mm。5 根空间钢构架混凝土梁的设计尺寸及材料规格如表 1 所示, 各试件配筋如图 1 所示。

表 1 试件设计尺寸及材料规格

Table 1 Design dimension and reinforcement of specimens

试件编号	截面尺寸 ($b/\text{mm} \times h/\text{mm}$)	计算剪跨比 λ	纵向钢筋(角钢)		箍筋(缀条)		配箍特征值 λ_v
			受压角钢(mm)	受拉角钢(mm)	规格(mm)	体积配箍率 $\rho_v/\%$	
SSFCB1	250 \times 350	2.01	2L70 \times 7	2L80 \times 7+2 Φ 20	-40 \times 3@105	1.88	0.282
SSFCB2	250 \times 350	2.01	2L70 \times 7	2L80 \times 7+2 Φ 20	-40 \times 3@150	1.31	0.198
SSFCB3	250 \times 350	2.01	2L70 \times 7	2L80 \times 7+2 Φ 20	-40 \times 3@180	1.09	0.165
SSFCB4	250 \times 350	2.01	2L70 \times 7	2L80 \times 7+2 Φ 20	-25 \times 3@150	0.82	0.123
SSFCB5	250 \times 350	2.01	2L70 \times 7	2L80 \times 7+2 Φ 20	-50 \times 3@150	1.64	0.247

注: 配箍特征值 $\lambda_v = \rho_v \cdot f_{yv} / f_c$ 。其中 f_{yv} 为缀条屈服强度, f_c 为混凝土轴心抗压强度, ρ_v 为缀条的体积配箍率, $\rho_v = \frac{4w_i A_{ss1}}{b_c d_c s}$, w_i 为纵向角钢间净距, A_{ss1} 为单个缀条的截面面积, s 为横向缀条间距, b_c 和 d_c 分别为两对边缀条中心之间的距离。



注: s 为缀条形心线之间的距离, d 为缀条宽度。单位为 mm。

图 1 各试件设计尺寸及配筋
Fig. 1 Design dimension and reinforcement of specimens

1.2 材料力学性能

按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)测得试块混凝土棱柱体抗压强度为 30.81 N/mm^2 , 弹性模量为 $3.17 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$, 混凝土立方体抗压强度为 30.84 N/mm^2 。按照《金属材料拉伸试验 第一部分: 室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)测得钢材的力学性能指标如表 2 所示。

表 2 实测钢材的力学性能

Table 2 Tested mechanical properties of steel

钢材规格 (mm)	屈服强度 / MPa	极限强度 / MPa	屈服应变 ($\mu\epsilon$)	弹性模量 / (10^5 MPa)
L70×7	282.67	395.71	1 525	2.17
L80×7	298.21	416.11	1 725	2.21
-25×3	343.74	413.78	1 675	2.34
-40×3	344.27	419.78	1 735	2.39
-50×3	362.10	439.14	1 768	2.42
Φ20	469.21	638.00	1 720	2.36

1.3 加载装置及加载制度

试验在 5 000 kN 电液伺服压力试验机上进行, 加载装置如图 2 所示。

各试件试验前进行预加载, 检查仪器设备是否正常工作。根据《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012) 确定加载制度, 试验采用荷载和位移混合控制的加载方式。在试件产生弯曲裂缝前, 每一级荷载增量 $\Delta P=20 \text{ kN}$; 在试件产生弯曲裂缝后, 每一级荷载增量 $\Delta P=40 \text{ kN}$; 当试件接近其屈服荷载时转为位移控制加载, 控制的位移级差为 2 mm ; 当试件达到其峰值荷载 P_m 后, 控制的位移级差改为 1 mm , 直至荷载下降至 $85\% P_m$, 试验结束。

1.4 量测内容

(1) 试验现象及破坏形态。分别记录试件产生竖向弯曲裂缝、腹剪斜裂缝以及发生屈服、达到峰

值荷载和极限荷载时的试验现象及破坏形态。

(2) 试件的荷载 (P)—跨中挠度 (δ) 关系曲线。荷载 (P) 通过 500 t 电液伺服压力试验机测读或通过加载点处的荷载传感器测读; 分别在试件的梁底跨中及支座处布置 3 个量程为 50 mm 的应变式位移计 (YHD-50), 位移计的布置如图 2 所示。试件的跨中挠度 (δ) 按式 (1) 确定,

$$\delta = \delta_1 - \frac{\delta_2 + \delta_3}{2} \quad (1)$$

式中: δ 为试件的跨中挠度; δ_1 , δ_2 和 δ_3 分别为梁底跨中及两个支座处应变式位移计的实测值。

(3) 控制截面处角钢、缀条等的应变。在加载点和支座之间剪跨区的缀条上粘贴电阻应变片, 以测量其应变变化; 在距支座 50 mm 的下部纵向钢筋或角钢上粘贴电阻应变片量测角钢应变。电阻应变片的应变值采用 DH382Net 静态应变测试分析系统采集。这里以试件 SSFCB3 的测点布置为例进行说明, 如图 3 所示。

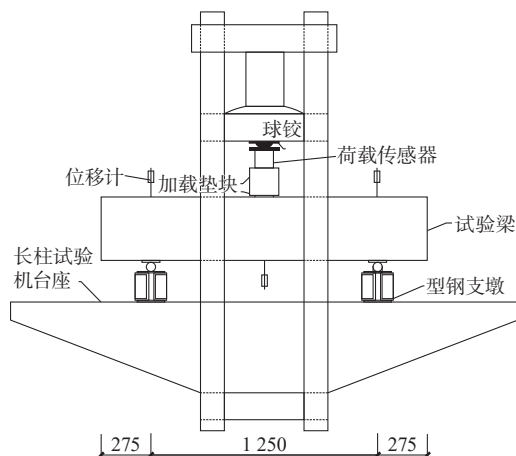
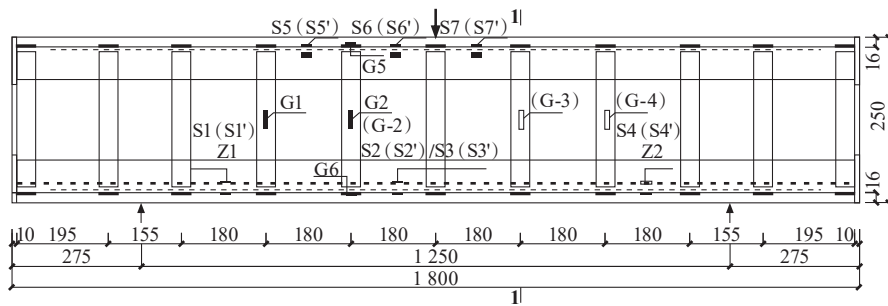
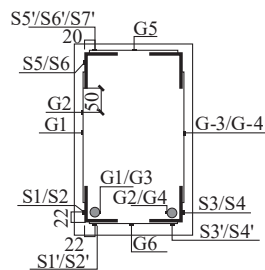


图 2 加载装置

Fig. 2 Test setup



a 试件 SSFCB3 正立面测点布置图



b 1—1 断面图

注: G1~G6 为正面缀条跨中应变片, G2~G-4 为反面缀条跨中应变片, S1~S7 为角钢竖肢应变片, S1'~S7' 为角钢横肢应变片, Z1~Z2 为圆钢应变片。

图 3 试件 SSFCB3 应变片布置图

Fig. 3 Strain gauge arrangement of SSFCB3 specimen

2 试验结果及分析

2.1 试验现象及破坏形态

试验过程中试件 SSFCB1~SSFCB5 均发生了剪切破坏,各试件的最终破坏形态如图 4 所示。限于篇幅,这里仅以试件 SSFCB3 为例描述试件的破坏全过程。



a 试件 SSFCB1



b 试件 SSFCB2



c 试件 SSFCB3



d 试件 SSFCB4



e 试件 SSFCB5

图 4 各试件最终破坏形态

Fig. 4 Final destruction form of each specimen

当荷载 $P < 80$ kN 时,整个试件处于弹性阶段,此时没有发现可见裂缝。当荷载增加至 80 kN 时,距试件跨中左侧约 170 mm 处出现第一条竖向弯曲裂缝,且延伸高度约为 50 mm。当试件出现弯曲裂缝时,荷载—跨中挠度曲线的斜率略微降低,试件进入弹塑性阶段。后面随着荷载不断增加,新的竖向弯曲裂缝不断出现,这些竖向弯曲裂缝延伸到一定高度后,开始斜向延伸至加载点。当加载至 200 kN 时,在试件正面距跨中右侧 200 mm 处出现第一条腹剪斜裂缝,此时构件的跨中竖向挠度为 2.08 mm。当加载至 310 kN 时,缀条和角钢未出现屈服,此时开展竖向挠度为 3.57 mm。当加载至 520 kN 时,荷载—跨中挠度曲线的斜率明显减小。这说明试件即将达到峰值荷载,此时试件改为位移控制加载,取 $d=3$ mm。当位移控制加载至 $1d$ 时,此时试件的缀条 (G1) 率先达到屈服应变 ($e_y=1\ 525\mu\varepsilon$),此时构件的跨中竖向挠度为 7.80 mm。同时在支座和加载点之间形成一条主斜裂缝,此时荷载为 639.5 kN。当位移加载至 $3d$ 时,腹剪裂缝的两侧混凝土产生了明显的错动,同时在销栓作用下,角钢应变开始逐渐增大,此时荷载为 725.4 kN。当位移加载至 $5d$ 时,梁腹斜裂缝之间的空间钢构架外侧的混凝土大片剥落,试件荷载开始下降,此时的荷载即为峰值荷载 ($P_m=750.20$ kN),这时除缀条 G4 未屈服外,其他缀条的应变均已达到或超过屈服应变。当位移加载至 $12d$ 时,试件荷载下降至 $P=627.10$ kN ($0.84P_m$),停止加载,试验结束。试件 SSFCB3 的最终破坏形态如图 4c 所示。

试件 SSFCB1~SSFCB5 的主要试验结果如表 3 所示。

表3 主要试验结果
Table 3 Main test results

试件编号	开裂特征值		屈服特征值		峰值特征值			极限特征值		
	P_{cr}/kN	δ_{cr}/mm	P_y/kN	δ_y/mm	P_m/kN	δ_m/mm	$\frac{\delta_m}{\delta_y}$	P_u/kN	δ_u/mm	$\frac{\delta_u}{\delta_y}$
SSFCB1	160	0.97	760.07	11.62	893.01	31.25	2.69	764.36	40.96	3.52
SSFCB2	100	1.13	768.19	12.46	878.30	26.07	2.09	721.40	32.46	2.61
SSFCB3	70	0.89	680.94	9.82	750.20	19.31	1.97	627.10	39.17	3.99
SSFCB4	140	1.19	605.07	8.71	698.00	20.15	2.31	674.00	27.91	3.20
SSFCB5	120	1.13	778.36	10.70	869.80	29.18	2.73	674.32	37.30	3.49

注: P_{cr} , P_y 和 P_m 分别为试件开裂荷载、屈服荷载、峰值荷载; δ_{cr} , δ_y 和 δ_m 分别为试件开裂荷载、屈服荷载、峰值荷载时对应的跨中挠度值; δ_m/δ_y 和 δ_u/δ_y 分别为试件达到峰值荷载和极限荷载时的剪切延性系数; 屈服荷载 P_y 及对应的跨中挠度值 δ_y 由等能量法确定; δ_u 为极限荷载 $P_u=0.85P_m$ 时对应的跨中挠度值。

2.2 荷载—跨中挠度曲线

试件 SSFCB1~SSFCB5 的荷载—跨中挠度 ($P-\delta$) 曲线如图 5 所示。

由图 5 可以看出:

(1) 试件出现弯曲裂缝前, 不同缀条间距、缀条宽度的 $P-\delta$ 曲线基本重合。

(2) 试件出现弯曲裂缝后, 曲线斜率并未改变, 即试件整体刚度降低很小。这是因为空间钢构架对混凝土的约束作用延缓了裂缝的发展。

(3) 试件接近峰值荷载时, 试件的荷载增长缓慢, 跨中挠度明显增大, 变形有较大的发展。这是因为空间钢构架与剪压区混凝土得到了充分接触, 空间钢构架对剪压区混凝土的约束作用得到较大提升, 使剪压区混凝土三向受压, 其抗压强度得到较大的提高, 直至缀条充分发挥作用。 $P-\delta$ 曲线充分说明了空间钢构件混凝土梁具有良好的变形性能。

在其他条件不变的情况下, 减小缀条间距可以显著提高试件的变形能力, 同时也可以显著提高试件的延性, 如图 5a 所示。表 3 中试件 SSFCB3, SSFCB2 和 SSFCB1 缀条间距分别从 180 mm 减小到 150 mm 和 105 mm, 剪切延性系数分别增大了 36.5% 和 36.5%。当缀条间距减小时, 空间钢构架对剪跨区内混凝土的约束作用增强, 其约束效果对试件变形能力的影响较大。

在其他条件不变的情况下, 增大缀条宽度可以显著提高试件的变形能力, 如图 5b 所示。由表 3 可见, 缀条宽度由 25 mm 增大为 40 mm 再增大为 50 mm, 剪切延性系数 δ_m/δ_y 增大了 44.8%。当缀条宽度增大时, 空间钢构架同样对剪跨区内混凝土约束作用增强, 抑制了约束混凝土斜裂缝的开裂及发展, 且其约束效果对试件变形能力的影响效果较减小缀条间距好。

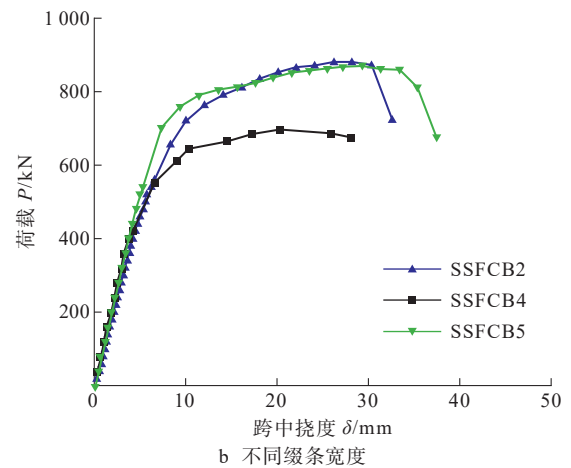
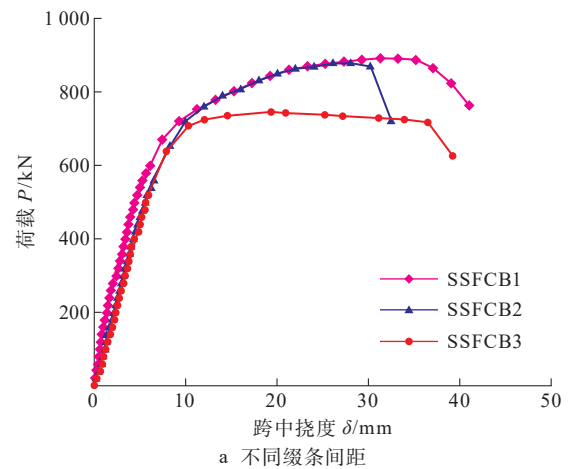


图5 试件荷载—跨中挠度 ($P-\delta$) 曲线

Fig. 5 Load-span medium deflection ($P-\delta$) curve of specimens

2.3 抗剪承载力分析

图 6a 给出了试件 SSFCB1, SSFCB2 和 SSFCB3 的抗剪承载力 (V_u) 与缀条间距 (s) 的关系。由图 6a 和表 2 可见, 试件 SSFCB1 ($s=105$ mm), SSFCB2 ($s=150$ mm) 和 SSFCB3 ($s=180$ mm) 的抗剪承载力分别为 446.51, 439.15, 375.10 kN。在其他

条件相同时,试件的抗剪承载力随缀条间距的增大而减小,且大致呈负线性关系。

图6b给出了试件SSFCB4, SSFCB2和SSFCB5的抗剪承载力(V_u)与缀条宽度(d)的关系。由图6b和表2可见,试件SSFCB4($d=25\text{ mm}$), SSFCB2($d=40\text{ mm}$)和SSFCB5($d=50\text{ mm}$)的抗剪承载力分别为349.00, 439.15, 430.17 kN。在其他条件相同时,试件的抗剪承载力随缀条宽度的增大而增大,且大致呈正线性关系。

图6c给出了试件SSFCB1~SSFCB5的抗剪承载力(V_u)与配箍特征值(λ_v)的关系。由图中可见,

在不改变其他参数的条件下,试件的抗剪承载力随着配箍特征值的增大而增大。空间钢构架混凝土梁斜截面抗剪承载力提高的主要原因为:①减小缀条间距或增大缀条宽度可增大构件的配箍特征值,能提高空间钢构架对剪压区混凝土的约束作用和剪压区混凝土强度,从而提高剪压区混凝土承担的剪力。②空间钢构架中受拉角钢竖肢提供一定的销栓力。③试验表明,空间钢构架混凝土梁临界斜裂缝水平投影长度平均值约为 $1.5h_0$,大于普通钢筋混凝土的取值 h_0 ,因此,参与抗剪的箍筋(缀条)数量增多,其承担的剪力值增大。

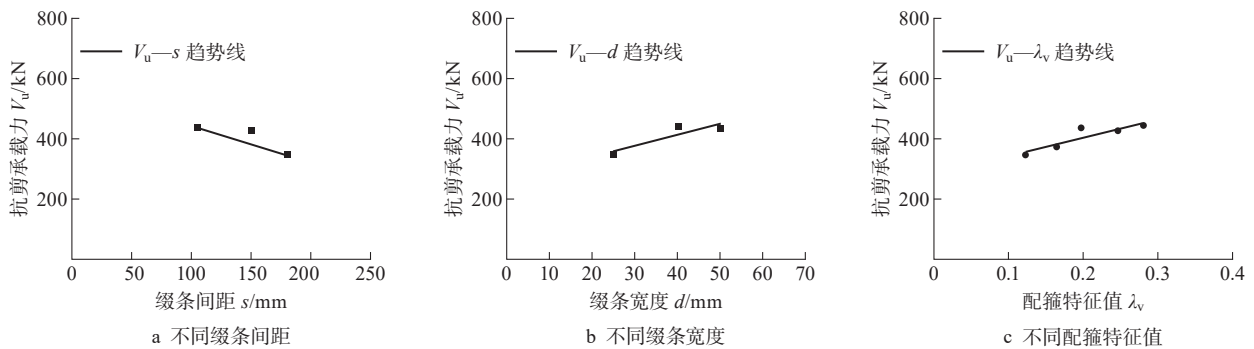


图6 各试件抗剪承载力与影响参数关系

Fig. 6 Relationship between shear bearing capacity and influence parameters of each specimen

2.4 钢材应变变化规律

图7展示了试件SSFCB3荷载与缀条、角钢应变之间的关系。由图7可以看出,试件发生剪压破坏时,

纵向受拉角钢均未达到其屈服应变,符合“强弯弱剪”的设计原则。当试件发生剪压破坏时,与临界斜裂缝相交的缀条都会产生屈服应变。

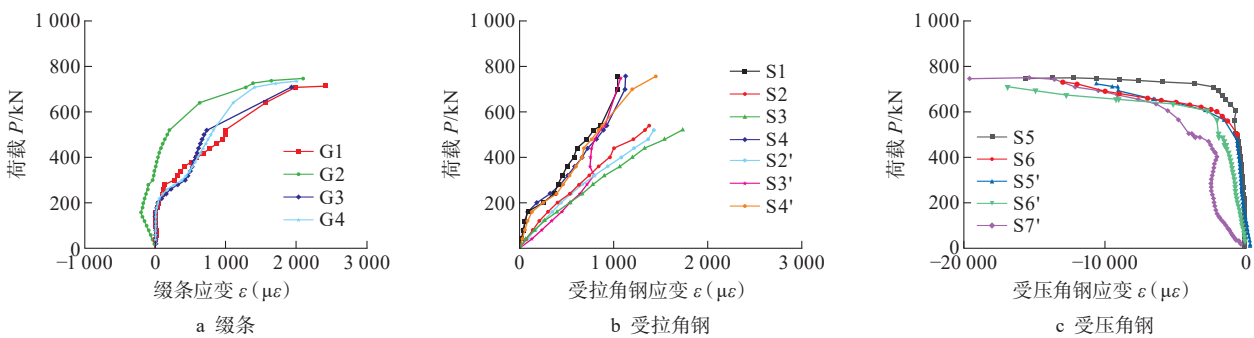


图7 试件SSFCB3荷载与缀条(角钢)应变(P-ε)曲线

Fig. 7 Load-strip (angle steel) strain (P-ε) curve of SSFCB3 specimen

3 结论

(1)在试件截面几何尺寸、材料性能、纵向角钢规格等相同时,减小缀条间距或增大缀条宽度可以显著提高空间钢构架混凝土梁的变形性能。

(2)空间钢构架混凝土梁的抗剪承载力随着配箍特征值的增大呈现出线性增加趋势,并具有更好的变形性能。

(3)按“强弯弱剪”设计的空间钢构架混凝土梁较普通钢筋混凝土梁的变形能力有显著的提高。

参考文献:

- [1] 唐兴荣. 空间钢构架混凝土柱的试验研究与设计建议[J]. 工业建筑, 2004, 34(9): 70-73.
- [2] 陈晓峰. 空间钢构架混凝土柱受力性能试验研究[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2015.
- [3] 王恺. 空间钢构架约束混凝土的本构关系及其轴压短柱的有限元分析[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2015.
- [4] 李伟强. 双空间钢构架混凝土柱抗震性能试验研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2016.
- [5] 刘尧彬, 唐兴荣. 空间钢构架高强混凝土约束机理的试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2018, 43(4): 1375-1385.
- [6] 张宇阳, 唐兴荣. 空间钢构架混凝土梁纯扭性能的有限元模拟分析[J]. 苏州科技大学学报(工程技术版), 2021, 34(3): 50-56.
- [7] KHALIFA E S, AI-TERSAWY S H. Experimental and analytical behavior of strengthened reinforced concrete columns with steel angles and strips[J]. International Journal of Advanced Structural Engineering, 2014, 6(2): 1-14.
- [8] BADALAMENTI V, CAMPIONE G, MANGIAVIL-LANO M L. Simplified model for compressive behavior of concrete columns strengthened by steel angles and strips[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2010, 136(2): 230-238.
- [9] 董鑫, 唐兴荣. 空间钢构件混凝土连续梁的弯矩重分布性能[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2022, 31(3): 49-56.
- [10] 龙林, 唐兴荣. 空间钢构架混凝土连续梁受弯性能试验研究[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2025, 34(3): 44-50.
- [11] 马健. 空腹式钢-混凝土组合梁抗剪性能试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
- [12] 韩志先. 预制桁架式钢骨混凝土箱梁抗剪承载力研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2020.
- [13] 刘嘉琪, 曹大富, 王琨, 等. 预应力桁架式钢骨混凝土梁抗剪承载力试验研究[J]. 工业建筑, 2021, 51(10): 14-20.
- [14] 张志鹏, 唐兴荣. 空间钢构架混凝土梁斜截面受剪性能分析[J]. 常州工学院学报, 2024, 37(1): 10-19.
- [15] 薛晶. 空间钢构架混凝土筒支梁抗剪承载力试验研究[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2013.

(责任编辑: 褚金红)

著作权使用声明

为适应我国信息化建设发展的需要, 有力地促进科研学术信息的交流和信息资源的开发利用, 扩展广大作者的学术交流渠道和促使科研成果的迅速转化, 本刊已先后加入了《中国学术期刊(光盘版)》《中国期刊网》、由国家科技部组织实施的原中国科技信息研究所万方数据网络中心具体负责运作的“万方数据网”、由科学技术部西南信息中心所创办的大型综合性《中文科技期刊数据库》, 并成为上述《中国学术期刊(光盘版)》《中国期刊网》《中国学术期刊综合评价数据库》《中国核心期刊(遴选)数据库》以及“万方数据——数字化期刊群”《中文科技期刊数据库》全文收录期刊, 它们将以网络和光盘等不同的方式向社会提供文献信息服务。凡向本刊所投稿件, 稿件发表后, 所有署名作者自愿将稿件的出版权(包括但不限于纸版、复制、汇编、发行、信息网络传播等)转让给本刊, 同意稿件进入本刊所加入的文献数据库, 各数据库的著作权使用费与文章评审费相抵, 不再另行支付。如有不同意者, 请另投他刊或特别声明需另作处理。

《江苏海洋大学学报(自然科学版)》编辑部