

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.068



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 机制砂掺量对自密实轻骨料混凝土梁受弯性能的影响

张淑云<sup>1</sup>, 刘建波<sup>1</sup>, 杨旭龙<sup>2</sup>, 李强<sup>1</sup>, 白苗苗<sup>1</sup>

(1. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 西安 710054; 2. 甘肃省建筑设计研究院有限公司, 兰州 730031)

**摘要:**为探究机制砂掺量对自密实轻骨料混凝土梁受弯性能的影响,设计制作了5根机制砂掺量分别为0%、30%、60%、80%、100%的自密实轻骨料混凝土梁,进行四点弯曲试验,研究不同机制砂掺量的自密实轻骨料混凝土梁在荷载作用下的挠度曲线、跨中挠度和裂缝分布形态,探究机制砂掺量对其开裂弯矩和受弯承载力的影响规律。结果表明:各试验梁截面平均应变符合平截面假定,荷载-挠度曲线基本相似。随着机制砂掺量的增加,自密实轻骨料混凝土梁产生次裂缝更多、裂缝分布更加均匀,在屈服前的同级荷载作用下,最大裂缝宽度减小;而跨中挠度和极限承载力在机制砂掺量为80%时达到最大,相较于全河砂自密实轻骨料混凝土梁,分别提高了16.13%和6.62%。采用轻骨料混凝土挠度计算公式得到的各试验梁挠度计算值与试验值有所差异。试验梁开裂弯矩采用规范公式计算,计算值与试验值差异较大。通过试验结果分析和受弯承载力计算,得出自密实轻骨料混凝土机制砂最优掺量为60%~80%。

**关键词:**自密实轻骨料混凝土梁;机制砂;受弯性能;破坏形态;开裂弯矩;受弯承载力

**中图分类号:**TU375.1; TU521.1    **文献标志码:**A    **文章编号:**2096-6717(2025)03-0142-09

## Effect of manufactured sand dosage on flexural performance of self-compacting lightweight aggregate concrete beams

ZHANG Shuyun<sup>1</sup>, LIU Jianbo<sup>1</sup>, YANG Xulong<sup>2</sup>, LI Qiang<sup>1</sup>, BAI Miaomiao<sup>1</sup>

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, P. R. China;  
2. Gansu Institute of Architectural Design and Research Co., Ltd., Lanzhou 730031, P. R. China)

**Abstract:** In order to explore the influence of manufactured sand dosage on the flexural performance of self-compacting lightweight aggregate concrete beams (SCLC), five SCLC with 0%, 30%, 60%, 80% and 100% manufactured sand dosage for four-point bending tests. The deflection curve, mid-span deflection and crack distribution of SCLC beams with different manufactured sand dosages under load were studied, and the influence of manufactured sand dosage on its cracking moment and flexural capacity was explored. The results show that the average strain of each test beam section conforms to the plane section assumption, and the load-deflection curves are basically similar. With the increase of manufactured sand dosage, the SCLC beam has

收稿日期:2023-03-01

基金项目:国家自然科学基金(51408483);陕西省自然科学基金(2021-JM-392)

作者简介:张淑云(1972-),女,博士,教授,主要从事混凝土结构基本理论及应用研究,E-mail:zhshy@xust.edu.cn。

Received: 2023-03-01

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 51408483); Natural Science Foundation of Shaanxi (No. 2021-JM-392)

**Author brief:** ZHANG Shuyun (1972-), PhD, professor, main research interests: basic theory and application of concrete structure, E-mail: zhshy@xust.edu.cn.

more secondary cracks and more uniform crack distribution. The maximum crack width decreases under the same load before yielding. The mid-span deflection and ultimate bearing capacity reach the maximum when the manufactured sand dosage was 80%, which were increased by 16.13% and 6.62% respectively compared with SCLC beams with all river sand. Utilising the deflection calculation formula of lightweight aggregate concrete, the deflection calculation value of each test beam differs from the test value. The cracking moment of the test beam was calculated using the standard formula, and the calculated value is quite different from the test value. Through the analysis of test results and calculation of flexural bearing capacity, it can be concluded that the optimal dosage of manufactured sand in SCLC is 60%-80%.

**Keywords:** self-compacting lightweight aggregate concrete beam; manufactured sand; flexural performance; destruction form; cracking moment; flexural bearing capacity

自密实轻骨料混凝土(self-compacting light-weight aggregate concrete, SCLC)是一种兼具自密实混凝土与轻骨料混凝土特点的高性能混凝土,具有免振捣、质量轻的特点,能有效减少施工噪声、减轻结构自重、降低结构地震效应<sup>[1]</sup>。目前在建设工程中已得到应用,如日本神户贸易中心大厦、珠海国际会议中心等。SCLC的细骨料多采用天然砂,近年来,随着天然砂资源逐渐匮乏以及环境保护的要求,机制砂替代天然砂已经成为趋势<sup>[2]</sup>。

机制砂(MS)是以质地坚硬的天然石为原料,由机械破碎、筛分制成的粒径小于4.75 mm的岩石颗粒<sup>[3]</sup>,具有颗粒尖锐、多棱角、针片状含量高、石屑颗粒微裂纹多、空隙较大等特点。现阶段已经展开将机制砂应用于SCLC的研究,一些学者在机制砂自密实轻骨料混凝土(MS-SCLC)配合比设计<sup>[4-6]</sup>、工作性能与力学性能<sup>[7-10]</sup>等方面开展了研究,结果表明:适量机制砂的掺入可以提高SCLC的力学性能,并且工作性能表现良好。

目前,部分学者开展了机制砂混凝土梁、轻骨料混凝土梁和自密实轻骨料混凝土梁的抗弯性能研究<sup>[11-15]</sup>。结果表明:机制砂使普通混凝土梁承载力略有提高;轻骨料混凝土梁与普通混凝土梁开裂荷载接近,而极限承载力接近或低于普通混凝土梁。针对MS-SCLC构件受力性能方面的试验研究较缺乏,机制砂掺量对SCLC梁受弯性能的影响有待研究。将机制砂应用于SCLC梁,由于涉及机制砂、轻骨料等集料对自密实混凝土性能的影响,加上钢筋与自密实混凝土的协同工作和机制砂掺量的影响,MS-SCLC梁受弯性能需通过加载试验进一步研究。故笔者通过对5根不同机制砂掺量的SCLC梁进行受弯性能试验,探究机制砂掺量对SCLC的裂缝分布形态、短期刚度、跨中挠度和正截面受弯承载力的影响,为MS-SCLC的应用提供基础试验研究。

## 1 试验概况

### 1.1 试验原材料

P·O 42.5硅酸盐水泥;I级粉煤灰,烧失量为2.8%;高活性微硅粉,SiO<sub>2</sub>含量为96.74%;羧酸高性能减水剂,减水率为28%。细骨料采用花岗岩岩性机制砂,连续级配,细度模数为3.1,河砂为级配良好的Ⅱ区中砂,细度模数为2.6;轻骨料采用800级碎石型页岩陶粒。试验梁纵向钢筋和箍筋均采用HRB400级,架立筋选用HPB300级。对每种直径钢筋进行拉拔试验<sup>[16]</sup>,表1所示为试验测得的钢筋力学性能指标。

表1 钢筋力学性能指标

Table 1 Mechanical properties of steel bars

类型	直径/mm	面积/mm <sup>2</sup>	屈服强度/f <sub>y</sub> /MPa	极限强度/f <sub>u</sub> /MPa	弹性模量E <sub>s</sub> /(N/mm <sup>2</sup> )
HRB400	16	201.1	427.6	586.8	2.0×10 <sup>5</sup>
HRB400	8	50.3	417.3	576.6	2.0×10 <sup>5</sup>
HPB300	10	78.5	331.2	509.6	2.1×10 <sup>5</sup>

### 1.2 混凝土配合比及力学性能

根据机制砂特性,采用改进的全参数MS-SCLC配合比计算公式<sup>[17]</sup>,通过对轻骨料进行预湿,并对用水量进行修正,以解决轻骨料上浮的问题。依此总共设计制作5组MS-SCLC,表2所示为混凝土配合比,机制砂掺量分别为0%、30%、60%、80%、100%。在试验梁浇筑过程中,对每一组混凝土拌合物的工作性能进行测试,测定其工作性能是否均满足自密实混凝土规范使用要求。每根试验梁预留6块100 mm×100 mm×100 mm的立方体试块和3块100 mm×100 mm×300 mm的棱柱体试块,用于测定MS-SCLC的立方体抗压强度、劈裂抗拉强度和轴心抗压强度,并与试验梁在相同环境下养护。表3、表4列出了混凝土的工作性能和基本力学性能指标。

### 1.3 试件参数

共设计制作 5 根 MS-SCLC 梁试件, 试验梁尺寸均为  $l \times b \times h = 2800 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ , 净

跨均为 2600 mm, 纯弯段和剪跨段分别为 900、850 mm。表 5 所示为试件设计参数, 图 1 所示为试验梁尺寸截面及配筋。

表 2 混凝土配合比

Table 2 Concrete mix proportion

编号	机制砂掺量/%	配合比/(kg/m <sup>3</sup> )						
		粗骨料	河砂	机制砂	水泥	粉煤灰	硅灰	水
SCLC	0	374.3	750.9	0	395.9	104.2	20.8	192.8
MS-SCLC-30	30	374.3	521.5	247.7	406.2	106.9	21.4	197.8
MS-SCLC-60	60	374.3	298.0	495.5	406.2	106.9	21.4	197.8
MS-SCLC-80	80	374.3	149.0	660.6	406.2	106.9	21.4	197.8
MS-SCLC-100	100	374.3	0	832.3	406.2	106.9	21.4	197.8

注: MS-SCLC 的用水量为总水量, 且包含粗骨料吸附水。

表 3 混凝土工作性能指标

Table 3 Working performance of concrete

编号	机制砂掺量/%	流动性				间隙通过性和抗离析性		
		坍落扩展度/mm	V型漏斗 $T_s/\text{s}$	$T_{500}/\text{s}$	性能等级	U 箱高度差/mm	J 环 $B_j/\text{mm}$	性能等级
SCLC	0	747	12	4	SF3	5	14	PA2
MS-SCLC-30	30	734	15	4	SF3	7	15	PA2
MS-SCLC-60	60	683	19	6	SF2	16	25	PA2
MS-SCLC-80	80	664	23	7	SF2	21	28	PA1
MS-SCLC-100	100	642	25	8	SF1	27	32	PA1

表 4 混凝土基本力学性能指标

Table 4 Basic mechanical properties of concrete

编号	机制砂掺量/%	骨料类型	立方体抗压强度		劈裂抗拉强度		轴心抗压强度		弹性模量试验值	
			$f_{cu}/\text{MPa}$	$f_{ik}/\text{MPa}$	$f_{ik}/\text{MPa}$	$f_c/\text{MPa}$	$E_c/10^4 \text{ MPa}$			
SCLC	0	轻骨料	41.1	3.16	3.16	33.17	2.15			
MS-SCLC-30	30	轻骨料	41.5	3.18	3.18	34.28	2.19			
MS-SCLC-60	60	轻骨料	42.7	3.25	3.25	36.55	2.28			
MS-SCLC-80	80	轻骨料	43.1	3.28	3.28	37.20	2.30			
MS-SCLC-100	100	轻骨料	43.6	3.35	3.35	37.56	2.33			

表 5 试件设计参数

Table 5 Specimen design parameters

试验梁编号	混凝土编号	机制砂掺量/%	骨料类型	纵向钢筋	配筋率/%	箍筋和架立筋
SJ-3-1	SCLC	0	轻骨料	2Φ16	1.02	
SJ-3-2	MS-SCLC-30	30	轻骨料	2Φ16	1.02	箍筋 Φ8@100
SJ-3-3	MS-SCLC-60	60	轻骨料	2Φ16	1.02	架立筋 2Φ10
SJ-3-4	MS-SCLC-80	80	轻骨料	2Φ16	1.02	
SJ-3-5	MS-SCLC-100	100	轻骨料	2Φ16	1.02	

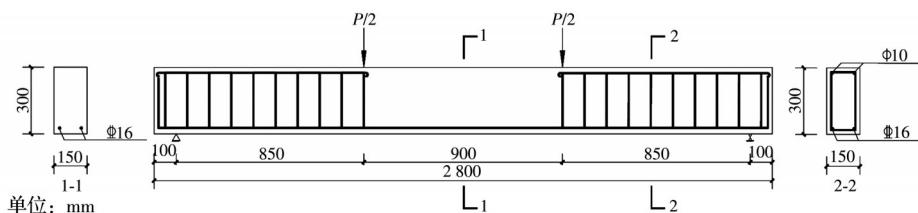


图 1 试验梁尺寸截面及配筋

Fig. 1 Section size and reinforcement of test beam

#### 1.4 试件制备及测点布置

图2所示为钢筋骨架,在受拉钢筋跨中布置钢筋应变片,标距为100 mm。图3为钢筋测点布置图,每根梁试件均一次性浇筑,不进行振捣压实。所有试件在浇注3 d后脱模,在自然条件下养护,直至测试。在试件跨中沿截面高度粘贴混凝土应变片,间距为50 mm,如图4所示。

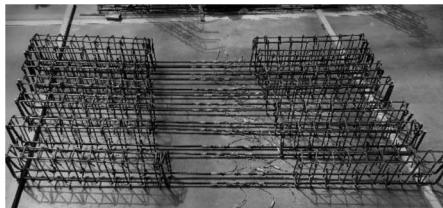


图2 钢筋骨架图

Fig. 2 Rebar skeleton

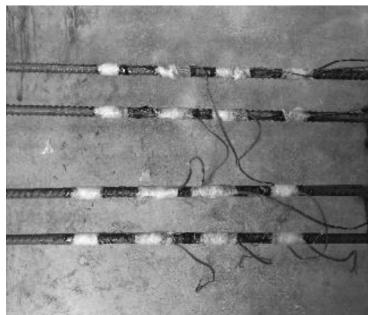


图3 钢筋测点布置图

Fig. 3 Layout of the steel bar measurement points

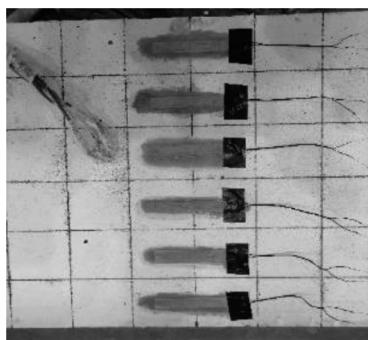


图4 混凝土测点布置图

Fig. 4 Layout of concrete measurement points

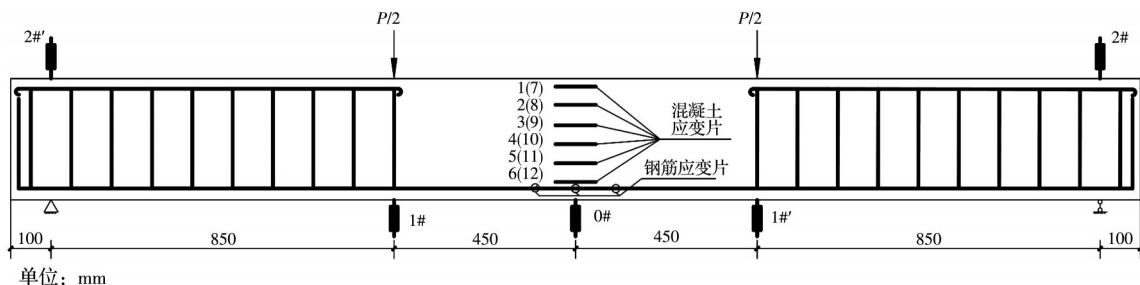


图5 试验梁测点布置示意图

Fig. 5 Schematic layout of the test beam measurement points

为测量机制砂自密实轻骨料混凝土梁在各级荷载下的挠度变化情况,在试验梁底部跨中位置布置1个位移计(0#),测量跨中挠度变化值;在试验梁支座顶部各布置1个位移计(2#、2#'),测量支座处沉降变形值;在试验梁加载点处各布置1个位移计(1#、1#'),测量加载点挠度变形值,如图5所示。

#### 1.5 试验装置

采用YAS-5000微机控制电液伺服压力试验机-分配梁系统分级施加集中荷载<sup>[18]</sup>。试验加载主要包括预加载和正式加载,其中预加载值为5 kN(未超过开裂荷载的70%),检验应变片、位移计、加载装置等是否正常工作。正式加载时以每5 kN为一级,加载至开裂荷载的90%时,以每2 kN为一级。开裂后,以每10 kN为一级进行加载,加载至屈服荷载的90%时,以每2 kN为一级。屈服后改为位移控制加载,以0.5Δ为一级进行加载,直至试验梁破坏,Δ为屈服前试验梁的跨中挠度值,图6为加载装置图。

## 2 试验结果分析

### 2.1 试验结果

图7所示为不同机制砂掺量的SCLC梁荷载-挠度关系曲线。由图7可见,各试验梁的荷载-挠度曲线都可以分为3个阶段:未裂阶段、带裂缝工作阶段、破坏阶段。在受力初期曲线的斜率较大,呈线性关系,各梁处于未裂阶段,其跨中挠度变化不大;当进入带裂缝工作阶段时,相较于未裂阶段,各试验梁的荷载-挠度曲线斜率减小,跨中挠度的增加速度明显快于前一阶段,各梁受拉区混凝土出现裂缝,退出工作;当荷载接近极限荷载时,各试验梁钢筋发生屈服,其承载力趋于稳定,而梁的挠度持续增加,梁底裂缝宽度也不断增加,直至受压区混凝土被压碎,梁产生弯曲破坏。纵观5根梁构件的破坏过程及曲线斜率可以发现,掺入机制砂可以改善混凝土的弹性模量,提高试验梁的刚度和极限荷载,当机制砂掺量为80%时,受弯承载力最大。



(a) YAS-5000压力试验机

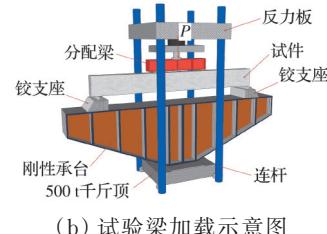


图6 加载装置图

Fig. 6 Loading device

表6为不同机制砂掺量的SCLC梁试验结果。由表6可知,随着机制砂掺量的增加,SCLC梁的开裂荷载不断增加,全机制砂掺量时开裂荷载提高最多,相较于SJ-3-1,提高了5.96%;屈服荷载在机制砂掺量为60%时达到最大,相较于SJ-3-1,提高了5.58%;极限荷载在机制砂掺量为80%达到最大,由此可知,在机制砂掺量为60%和80%时,SCLC

表6 不同机制砂掺量试验梁的试验结果  
Table 6 Test beam results for different MS contents

试验梁编号	开裂荷载 $P_{cr}/kN$	开裂时裂缝 宽度/mm	屈服荷载 $P_y/kN$	屈服时裂缝 宽度/mm	极限荷载 $P_u/kN$	破坏时裂缝 宽度/mm	屈服位移 $\Delta_y/mm$	极限位移 $\Delta_u/mm$	位移延性 $\mu$
SJ-3-1	9.73	0.10	84.2	0.22	106.6	2.01	9.01	37.5	4.16
SJ-3-2	9.77	0.08	83.4	0.23	107.0	1.95	9.21	38.5	4.18
SJ-3-3	10.13	0.09	88.9	0.25	110.2	3.14	9.7	43.5	4.48
SJ-3-4	10.26	0.10	87.8	0.26	113.6	4.12	9.94	44.4	4.47
SJ-3-5	10.31	0.07	85.1	0.26	109.4	3.18	9.34	43.4	4.65

由表6还可看出,机制砂的掺入可以提高SCLC梁的屈服位移和极限位移,掺量为80%时,SCLC梁的屈服位移和极限位移最大,且随着机制砂掺量的增加,相较于SCLC梁SJ-3-1,MS-SCLC梁(SJ-3-2~SJ-3-5)的位移延性系数提升了0.48%~11.6%,说明机制砂的掺入可以提高SCLC梁的延性,SCLC各试验梁位移延性系数均大于4。

## 2.2 裂缝分布形态

图8为荷载-裂缝宽度曲线,裂缝宽度采用裂缝宽度监测仪进行测量,图9所示为试件破坏时纯弯段裂缝分布形态。由图8、图9可见,从开裂到破坏,各试验梁裂缝的发展趋势基本相似。MS-SCLC梁较SCLC梁的开裂荷载高,其裂缝延伸速度较慢且产生次裂缝更多,分布更均匀;屈服前,此类梁试件在同级荷载作用下最大裂缝宽度更小,达到破坏状态时,由于掺有机制砂的SCLC梁的承载力较高,导致梁破坏时的最大裂缝宽度较大。

## 2.3 梁截面不同高度处的平均应变

试验量测了一定标距范围内的纵向钢筋应变及各级荷载下各测点的混凝土应变,图10所示为试

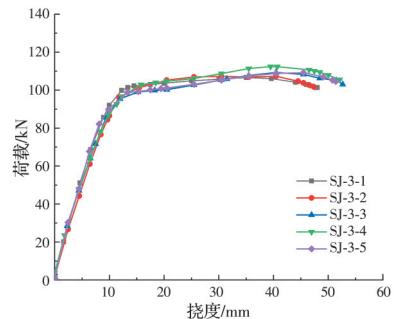


图7 试验梁荷载-挠度曲线

Fig. 7 Load-deflection curves of test beams

梁受弯性能最好。机制砂的掺入可以提高其极限承载力,这是因为机制砂棱角尖锐、针片状含量高,含有一定量的石粉,使其与水泥凝胶之间能够产生较大的机械咬合力,提高骨料与浆体的粘结性能,石粉增加了混凝土的密实度,导致构件所能承受的荷载增大。

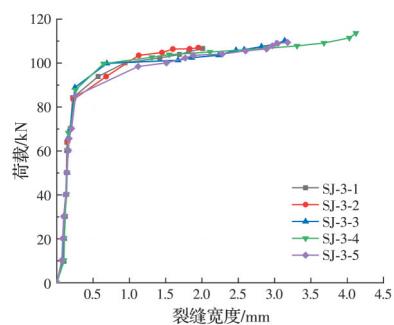


图8 荷载-裂缝宽度曲线

Fig. 8 Load-crack width curves

验梁不同截面高度处的应变分布。由图10可见,从加载至纵向钢筋屈服前,混凝土应变沿截面高度近似呈直线分布;纵向钢筋屈服后,裂缝不断增多,在某一特定截面,混凝土应变沿截面高度不符合线性分布关系。但纵向钢筋屈服后,按位移继续加载至 $1.5\Delta \sim 6\Delta$ ,各试件纵向钢筋的平均应变与受压区混凝土应变符合线性分布关系,平截面假定适用。

## 3 短期刚度和跨中挠度计算

根据《轻骨料混凝土结构设计规程》(JGJ/T 12—2019)<sup>[19]</sup>,钢筋轻骨料混凝土受弯构件短期刚度 $B_s$ 计

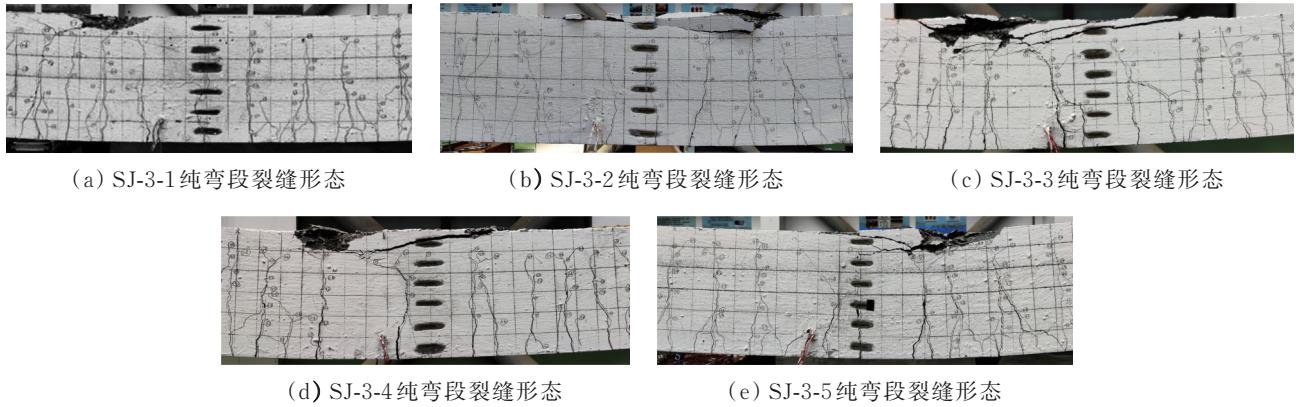


图9 试件破坏时纯弯段裂缝形态

Fig. 9 Crack distribution pattern of pure bending section during specimen failure

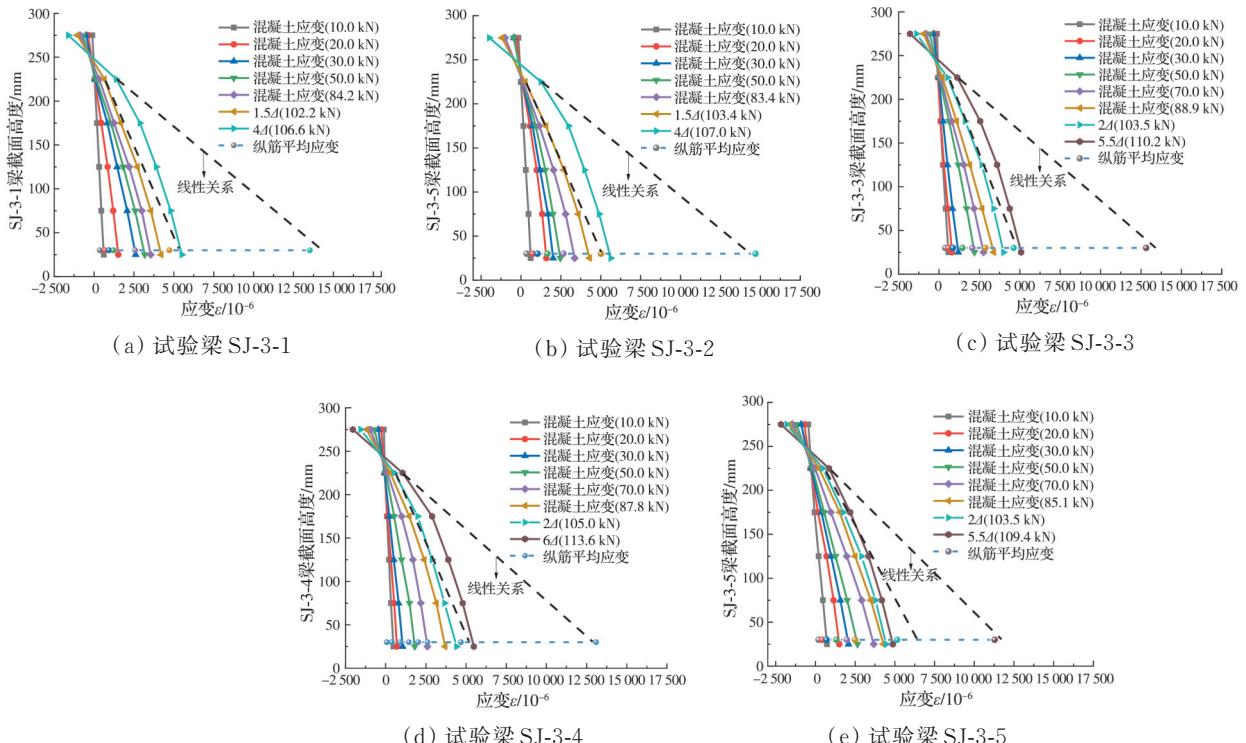


图10 试验梁不同截面高度处应变分布图

Fig. 10 Strain distribution at different section heights of test beam

算公式为

$$B_s = \frac{E_s A_s h_0^2}{1.15\psi + 0.2 + \frac{6\alpha_E \rho}{1 + 3.5\gamma'_f}} \quad (1)$$

式中: $\psi$ 为裂缝间受拉钢筋应变不均匀系数,其规范计算公式为 $\psi_1 = 1.0 - 0.65 f_{tk}/(\rho_{te} \sigma_{ss})$ ,也可通过裂缝间钢筋的平均应变与裂缝处的钢筋应变比值求得 $\psi_2 = \bar{\epsilon}/\epsilon_{max}$ ; $\alpha_E$ 为钢筋弹性模量与机制砂自密实轻骨料混凝土弹性模量的试验比值, $\alpha_E = E_s/E_c$ ; $\rho_{te}$ 为按有效受拉轻骨料混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋配筋率,且矩形受弯构件 $A_{te} = 0.5bh$ , $\rho_{te} = A_s/A_{te}$ ; $\rho$ 为纵向受拉钢筋配筋率, $\rho = A_s/bh_0$ ; $\gamma'_f$ 为受拉翼缘截面面积与腹板有效截面面积的比值,

$$(b_f - b)h_f/(bh_0)$$

钢筋混凝土受弯构件应满足正常使用极限状态要求,进行挠度验算时,计算公式为

$$f = S \frac{M l_0^2}{B_s} \quad (2)$$

式中: $M = 0.6M_u$ ; $S$ 为挠度系数,试验为三分点集中加载、支承形式为简支梁,故 $S$ 取值为 $S = 0.1065$ ; $B_s$ 为MS-SCLC梁的短期刚度。按照上述方法进行计算,试验梁短期刚度及跨中挠度的计算值与试验值见表7。

由表7可知,随着机制砂掺量的增加,SCLC梁短期刚度有所提高,跨中挠度在机制砂掺量为80%时达到最大,相较于全河砂SCLC梁SJ-3-1,提高了

表7 试验梁短期刚度及跨中挠度的计算值与试验值

Table 7 Test beam short-term stiffness and mid-span deflection calculation and test value

试件编号	$0.6M_u$	$\psi_1$	$\psi_2$	短期刚度 $B_s^1/(N \cdot mm^2)$	短期刚度 $B_s^2/(N \cdot mm^2)$	计算值 $f_1/mm$	计算值 $f_2/mm$	试验值 $f/mm$	$f_2/f$
SJ-3-1	27.2	0.71	0.89	$3.53 \times 12$	$3.13 \times 12$	5.6	6.3	6.2	0.98
SJ-3-2	27.3	0.71	0.89	$3.56 \times 12$	$3.14 \times 12$	5.5	6.3	6.2	0.99
SJ-3-3	28.1	0.71	0.86	$3.60 \times 12$	$3.25 \times 12$	5.6	6.2	6.6	1.06
SJ-3-4	29.0	0.72	0.83	$3.59 \times 12$	$3.32 \times 12$	5.8	6.3	7.2	1.14
SJ-3-5	27.9	0.70	0.78	$3.67 \times 12$	$3.45 \times 12$	5.5	5.8	6.2	1.06

注: $f_1, B_s^1$ 由计算参数 $\psi_1 = 1.0 - 0.65 f_{ik}/(\rho_{te} \sigma_{ss})$ 求得; $f_2, B_s^2$ 由计算参数 $\psi_2 = \bar{\epsilon}/\epsilon_{max}$ 求得。

16.13%,这是因为承载力提高,导致试件破坏时的挠度增大。进行挠度验算时,若 $\psi_1$ 采用规范计算公式计算,挠度计算值 $f_1$ 与试验值相差较大,这是因为试验梁的钢筋应变不均匀系数均大于轻骨料混凝土。这是由于此类自密实混凝土粗骨料含量少、胶凝材料含量高,加上钢筋与混凝土的粘结力能力降低、纯弯段的裂缝开展比较均匀,次裂缝更多,最终导致钢筋应变不均匀系数均大于轻骨料混凝土,故按照《轻骨料混凝土应用技术标准》中的挠度计算公式对MS-SCLC试验梁的挠度进行计算时,计算值与试验值有所差异。因此,本文采用裂缝间钢筋的平均应变与裂缝处的钢筋应变比值对 $\psi_2$ 进行求解,即 $\psi_2 = \bar{\epsilon}/\epsilon_{max}$ ;分析时,裂缝间钢筋的平均应变取该级荷载下2根钢筋6个测点处的应变平均值,裂缝处的钢筋应变取测点处的最大应变,最终得出的试验梁挠度计算值 $f_2$ 与试验值较为接近。

## 4 试验梁开裂弯矩及正截面受弯承载力计算

### 4.1 试验梁开裂弯矩计算分析

参照《水工混凝土结构设计规范》(SL 191—2008)<sup>[20]</sup>,MS-SCLC试验梁开裂弯矩计算公式为

$$M_{cr} = \gamma_m \alpha_{ct} f_{ik} W_0 \quad (3)$$

式中: $\gamma_m$ 为截面抵抗矩塑性系数,取1.55; $\alpha_{ct}$ 为混凝土拉应力限制系数,取0.85; $f_{ik}$ 为混凝土劈裂抗拉强度,按照表4取值; $W_0$ 为换算截面受拉边缘的弹性抵抗矩,取 $W_0 = I_0/(h - y_0)$ ,其中 $I_0$ 为换算截面对重心轴的惯性矩, $h_0$ 为截面有效高度, $y_0$ 为换算截面重心至受压边缘的距离。表8为试验梁开裂弯矩计算值与试验值的对比。

由试验结果可知:MS-SCLC梁开裂荷载约占极限荷载的9.03%~9.42%,与现有同类或相似材料<sup>[21-22]</sup>的试验结果接近。由表8可知:随着机制砂掺量的增加,SCLC梁开裂弯矩不断增加,这是因为机制砂较为粗糙,且具有棱角尖锐、针片状多等特点,与水泥凝胶之间能够产生较大的机械咬合力,提高

表8 试验梁开裂弯矩计算值与试验值的对比

Table 8 Comparison between calculated and tested cracking moment values of the test beams

试件编号	抗拉强度 $f_{ik}/MPa$	$M_{cr}^t/(kN \cdot m)$	$M_{cr}^c/(kN \cdot m)$
SJ-3-1	3.16	4.14	12.39
SJ-3-2	3.18	4.15	12.41
SJ-3-3	3.25	4.31	12.55
SJ-3-4	3.28	4.36	12.64
SJ-3-5	3.35	4.38	12.87

注: $M_{cr}^t$ 为开裂弯矩试验值; $M_{cr}^c$ 为 $\gamma_m = 1.55$ 、 $W_0$ 采用规范计算公式的开裂弯矩计算值。

骨料与浆体的粘结性能。机制砂在碾碎后会产生粒径小于0.075 mm的石粉,随着机制砂掺量的增加,石粉含量增加,能够优化细骨料的堆积密度,同时提高混凝土密实度,从而提高混凝土强度,最终导致混凝土梁开裂弯矩增加。当 $\gamma_m = 1.55$ 、 $W_0$ 采用规范计算公式时,试验梁开裂弯矩计算值 $M_{cr}^c$ 较试验值偏大,故用现行规范计算公式不能较好地表达MS-SCLC梁的开裂弯矩。

### 4.2 试验梁正截面受弯承载力计算分析

试验梁的破坏模式与普通混凝土相似,以试验梁破坏时的等效矩形应力图作为正截面承载力计算依据,根据力平衡条件及力矩平衡条件,可求出等效矩形应力图受压区高度和承载力,计算公式为

$$\begin{cases} \sum M = 0 & M_u = \alpha_1 f_c b x \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) \\ \sum X = 0 & \alpha_1 f_c b x = f_y A_s \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\alpha_1$ 为受压区混凝土等效矩形应力图系数,按照《轻骨料混凝土应用技术标准》,该类混凝土建议取值为1.0; $x$ 为等效矩形应力图受压区高度; $f_c$ 为棱柱体试块轴心抗压强度,按照表4取值; $f_y$ 为钢筋的抗拉强度,按照表1取值; $h_0$ 为截面有效高度, $h_0 = h - a_s$ 且 $a_s = c + d_v + d/2$ ; $M_u$ 为试验梁正截面受弯承载力。

将测得的各试验梁相关材料参数代入式(4),得到极限承载力计算值 $M_u^c$ 与极限承载力试验值 $M_u^t$ ,表9所示为试验梁极限承载力计算值与试验值

的对比。由表9可知: $M_u^t/M_u^c$ 的平均值 $\bar{x}=1.09$ ,标准差 $\sigma=0.02$ ,变异系数 $\delta=0.02$ ,说明普通混凝土承载力公式可用于MS-SCLC梁的承载力计算,但该公式未考虑混凝土抗拉强度,不能准确反映出机制砂掺量对其承载力的影响。

表9 试验梁极限承载力计算值与试验值的对比

Table 9 Calculated and experimental values of the ultimate bearing capacity of test beams

试件编号	$M_u^c/(kN\cdot m)$	$M_u^t/(kN\cdot m)$	$M_u^t/M_u^c$
SJ-3-1	42.4	45.3	1.07
SJ-3-2	42.6	45.5	1.07
SJ-3-3	42.7	46.8	1.10
SJ-3-4	42.7	48.3	1.13
SJ-3-5	42.8	46.5	1.09

从表9数据可以看出:机制砂的掺入可以提高SCLC梁的承载力,当机制砂掺量为80%时,承载力提高最大,当机制砂掺量为100%时,相较于机制砂掺量为80%时,其极限承载力有所降低。由图10可知,随着机制砂掺量的增加,混凝土开裂后,裂缝沿截面高度向上扩展程度下降,截面实际受压区高度增加,混凝土受压区合力作用位置下降,导致截面内力臂高度减小。由表4可知,随着机制砂掺量的增加,SCLC抗拉强度和抗压强度增加,混凝土受压区合力增加,当机制砂掺量为100%时,虽然混凝土受压区合力增加,但截面内力臂高度减小明显,截面受弯承载力反而下降;并且,由于机制砂掺量的增加,SCLC工作性能不断下降,在试件制作过程中,由于不振捣仅依靠混凝土流动密实成型,其工作性能对力学强度有一定影响。综合以上分析,建议SCLC中机制砂的掺量取60%~80%,可以充分发挥此类材料的力学性能。

## 5 结论

通过对5根不同机制砂掺量的SCLC梁构件进行正截面承载力试验,得到以下结论:

1) MS-SCLC梁受弯破坏过程分为3个阶段:未裂阶段、带裂缝工作阶段、破坏阶段。裂缝形态方面,MS-SCLC梁较SCLC梁产生次裂缝更多,裂缝分布更为均匀;屈服前,此类试件在同级荷载作用下的最大裂缝宽度较小。机制砂的掺入改善了混凝土的延性,提高了混凝土的抗裂能力。

2) 纵向钢筋屈服前,MS-SCLC梁试件混凝土应变沿截面高度近似呈直线分布,钢筋屈服后,按位移加载至 $1.5\Delta \sim 6\Delta$ ,各试件纵向钢筋的平均应变和受压区混凝土应变符合线性关系;同普通钢筋混凝土梁相似,弯矩-挠度曲线有两个明显转折点。

3) 机制砂的掺入可以提高SCLC梁的短期刚度和破坏时的跨中挠度,且在机制砂掺量为80%时,

SCLC梁跨中挠度达到最大。MS-SCLC梁钢筋应变不均匀系数均大于轻骨料混凝土,采用《轻骨料混凝土应用技术标准》挠度计算公式对MS-SCLC试验梁的挠度进行验算,计算值与试验值有差异。

4) 随着机制砂掺量的增加,SCLC梁的开裂弯矩不断增加,采用规范中梁开裂弯矩公式对MS-SCLC开裂弯矩进行计算,计算值与试验值差异较大;正截面受弯承载力也随着机制砂的掺入而提高,当机制砂掺量为80%时,SCLC梁的极限承载力提高最多,相较于SCLC梁,提高了6.62%。可采用普通混凝土承载力公式对MS-SCLC梁受弯承载力进行计算。通过试验现象、结果分析及受弯承载力计算,得出SCLC的机制砂最优掺量为60%~80%。

## 参考文献

- [1] TING T Z H, RAHMAN M E, LAU H H, et al. Recent development and perspective of lightweight aggregates based self-compacting concrete [J]. Construction and Building Materials, 2019, 201: 763-777.
- [2] PRITHIKA A J, SEKAR S K. Mechanical and fracture characteristics of Eco-friendly concrete produced using coconut shell, ground granulated blast furnace slag and manufactured sand [J]. Construction and Building Materials, 2016, 103: 1-7.
- [3] 人工砂混凝土应用技术规程: JGJ/T 241—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
Technical specification for application of manufactured sand concrete: JGJ/T 241—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [4] 张淑云, 周杰, 张政, 等. 基于正交试验的机制砂自密实轻骨料混凝土配合比设计 [J]. 混凝土与水泥制品, 2021(12): 84-88, 93.  
ZHANG S Y, ZHOU J, ZHANG Z, et al. Mix proportion design of machine-made sand self-compacting lightweight aggregate concrete based on orthogonal test [J]. China Concrete and Cement Products, 2021(12): 84-88, 93. (in Chinese)
- [5] 张胜, 周以林. 基于正交试验的机制砂混凝土配合比设计与研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(5): 1097-1102.  
ZHANG S, ZHOU Y L. Design and investigation of orthogonal experiment of mix proportion for mechanical sand concrete [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(5): 1097-1102. (in Chinese)
- [6] HWANG C L, HUNG M F. Durability design and performance of self-consolidating lightweight concrete [J]. Construction and Building Materials, 2005, 19(8): 619-626.
- [7] 张淑云, 王恩, 周杰, 等. 骨料对自密实混凝土工作性能和力学性能的影响 [J]. 中国科技论文, 2022, 17(4): 437-443.

- ZHANG S Y, WANG E, ZHOU J, et al. The influence of aggregate on the working performance and mechanical properties of self-compacting concrete [J]. China Sciencepaper, 2022, 17(4): 437-443. (in Chinese)
- [8] 张云国, 吴智敏, 张小云, 等. 自密实轻骨料混凝土的工作性能 [J]. 建筑材料学报, 2009, 12(1): 116-120.
- ZHANG Y G, WU Z M, ZHANG X Y, et al. Workability of self-compacting lightweight concrete [J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(1): 116-120. (in Chinese)
- [9] 杨旭龙. 机制砂掺量对自密实轻骨料混凝土梁受弯性能影响研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2022: 12-15.
- YANG X L. Study on the influence of manufactured sand replacement rate on flexural performance of self-compacting lightweight aggregate concrete beam [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2022: 12-15. (in Chinese)
- [10] CHOI Y W, KIM Y J, SHIN H C, et al. An experimental research on the fluidity and mechanical properties of high-strength lightweight self-compacting concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(9): 1595-1602.
- [11] 夏晋, 徐彦帆, 李天, 等. 机制砂钢筋混凝土梁受弯与受剪性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2019, 40(5): 71-79.
- XIA J, XU Y F, LI T, et al. Experimental study on flexural and shear behaviors of reinforced concrete beams made with manufactured sands [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(5): 71-79. (in Chinese)
- [12] 唐军务, 张琦彬, 黄长虹, 等. 轻集料钢筋混凝土梁受弯性能试验研究 [J]. 海军工程大学学报, 2009, 21(5): 77-81.
- TANG J W, ZHAG Q B, HUANG C H, et al. Experimental study on bending behavior of light aggregate concrete beams [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2009, 21(5): 77-81. (in Chinese)
- [13] 唐军务, 张琦彬, 雷霜如, 等. 轻骨料混凝土梁弯曲性能试验研究 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(3): 269-273.
- TANG J W, ZHANG Q B, LEI S R, et al. Experimental research on flexural behaviors of lightweight concrete beams [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, 38(3): 269-273. (in Chinese)
- [14] 刘香, 银俊, 何玉青. 轻骨料混凝土梁受弯性能研究 [J]. 施工技术, 2010, 39(Sup 1): 625-627.
- LIU X, YIN J, HE Y Q. Study on behavior of lightweight aggregate concrete beams [J]. Construction Technology, 2010, 39(Sup 1): 625-627. (in Chinese)
- [15] 董健苗, 周悦志, 李洋洋, 等. 自密实轻骨料混凝土梁抗弯性能试验研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2019(4): 65-69.
- DONG J M, ZHOU Y Z, LI Y Y, et al. Experimental study on flexural behavior of self-compacting lightweight aggregate concrete beams [J]. China Concrete and Cement Products, 2019(4): 65-69. (in Chinese)
- [16] 金属材料拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- Metallic materials-Tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228.1—2010 [S]. Beijing: China Standard Press, 2010. (in Chinese)
- [17] 周杰. 多尺度下机制砂自密实轻骨料混凝土力学性能研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2021: 19-21.
- ZHOU J. Study on mechanical properties of self-compacting lightweight aggregate concrete with manufactured sand at multi-scale [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2021: 19-21. (in Chinese)
- [18] 混凝土结构试验方法标准: GB/T 50152—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Standard for test method of concrete structures: GB/T 50152—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [19] 轻骨料混凝土应用技术标准: JGJ/T 12—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- Technical standard for application of lightweight aggregate concrete: JGJ/T 12—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [20] 水工混凝土结构设计规范: SL 191—2008 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- Design code for hydraulic concrete structures: SL 191—2008 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2009. (in Chinese)
- [21] 胡琼, 颜伟华. 自密实混凝土梁正截面受弯性能试验 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(10): 26-30.
- HU Q, YAN W H. Experimental study on flexural behavior of normal section of self-compacting concrete beam [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(10): 26-30. (in Chinese)
- [22] 黄晖, 叶燕华, 韩娟, 等. 自密实混凝土受弯梁受力性能试验 [J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2011, 33(1): 95-100.
- HUANG H, YE Y H, HAN J, et al. Flexure bearing property experiment of self-compacting concrete beams [J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2011, 33(1): 95-100. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)