复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica

钢纤维沙漠砂混凝土梁受弯力学性能试验

秦拥军 张亮亮 渠长伟 罗玲

Flexural mechanical properties of steel fiber desert sand concrete beams

QIN Yongjun, ZHANG Liangliang, QU Changwei, LUO Ling

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211206.002

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

BFRP筋钢纤维高强混凝土梁受弯承载力试验与理论

Experimental and theoretical study on the flexural capacity of high-strength concrete beams reinforced with BFRP bars and steel fiber

复合材料学报. 2018, 35(12): 3313-3323 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180319.004

混合配筋钢纤维增强混凝土梁受弯承载力试验及理论计算

Experimental and theoretical calculation on the flexural capacity of steel fiber reinforced concrete beams with hybrid reinforcing bars

复合材料学报. 2020, 37(9): 2348-2357 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200212.003

钢纤维-橡胶/混凝土单轴受压全曲线试验及本构模型

Experiment on stress-strain behavior and constitutive model of steel fiber-rubber/ concrete subjected to uniaxial compression

复合材料学报. 2021, 38(7): 2359-2369 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200916.001

钢纤维对超高性能混凝土抗弯力学性能的影响

Effect of steel fibers on the flexural response of ultra-high performance concrete

复合材料学报. 2018, 35(3): 722-731 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170612.005

钢纤维-橡胶/混凝土抗剪性能试验

Experimental study on shear behavior of steel fiber-rubber/concrete

复合材料学报. 2020, 37(12): 3201-3213 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200507.005

钢纤维及陶粒掺量对轻质混凝土基本力学性能的影响

Influence of steel fibre and haydite adding content on the basic mechanical properties of lightweight concrete

复合材料学报. 2018, 35(5): 1306-1314 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170808.007

复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica

第 39 卷 第 11 期 11 月 2022 年
Vol. 39 No. 11 Nov 2022

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20211206.002

钢纤维沙漠砂混凝土梁受弯力学性能试验

分享本文

秦拥军[1,2]，张亮亮[*1]，渠长伟[1]，罗玲[1,2]

（1. 新疆大学 建筑工程学院，乌鲁木齐 830047；2. 新疆土木工程技术研究中心，乌鲁木齐 830047）

摘 要：适量沙漠砂作为细骨料制备混凝土可有效提高混凝土的抗压强度，而钢纤维的掺入对混凝土抗拉性能有显著的提升作用。为探究钢纤维沙漠砂混凝土梁受弯力学特性，设计 11 根试验梁，分别研究钢纤维体积掺量、沙漠砂替代率和配筋率对受弯梁的影响规律。试验研究表明，钢纤维沙漠砂混凝土梁相对于普通混凝土梁其受弯承载力提高了 4%~22%，受弯梁裂缝数量随钢纤维掺量增加呈现降低趋势，钢纤维减小了混凝土表面的弹塑性变形，而“桥架作用”抑制了裂缝的产生和提高了试验梁的承载力；随着配筋率的增加，主裂缝宽度呈减小的趋势，但极限荷载则逐渐增加，表明配筋率是影响受弯梁承载力主要因素之一；沙漠砂的“填充作用”密实了混凝土，使构件整体性能呈现良好的状态。试验梁的开裂荷载、修正后的极限弯矩理论计算值和试验值吻合效果良好，误差均小于 5%。沙漠砂替代工程用砂制备混凝土，可以充分发挥当地资源优势，节约河砂资源，保护河湖生态环境，达到绿色建筑目标。

关键词：钢纤维体积掺量；沙漠砂替代率；裂缝规律；桥架作用；填充作用；混凝土梁

中图分类号：TU528.52 **文献标志码**： A **文章编号**： 1000-3851(2022)11-5599-12

Flexural mechanical properties of steel fiber desert sand concrete beams

QIN Yongjun[1,2], ZHANG Liangliang[*1], QU Changwei[1], LUO Ling[1,2]

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;
2. Xinjiang Civil Engineering Technology Research Center, Urumqi 830047, China)

Abstract: Appropriate amount of desert sand as fine aggregate can effectively improve the compressive strength of concrete, and the incorporation of steel fiber has a significant effect on the tensile properties of concrete. In order to explore the flexural mechanical properties of steel fiber desert sand concrete beams, 11 test beams were designed to study the influence of steel fiber volume content, desert sand replacement rate and reinforcement ratio on flexural beams. The result shows that the flexural bearing capacity of steel fiber desert sand concrete beam is increased by 4%-22% compared with that of ordinary concrete beam, and the number of cracks in the flexural beam decreases with the increase of steel fiber content. Steel fiber reduces the elastic-plastic deformation of concrete surface, and the ‘bridge action’ inhibits the generation of cracks and improves the bearing capacity of the test beam. With the increase of reinforcement ratio, the main crack width decreases, but the ultimate load increases gradually, which indicates that the reinforcement ratio is one of the main factors affecting the bearing capacity of the bending beam. The ‘filling effect’ of desert sand compacts the concrete and makes the overall performance of the component present a good state. The cracking load of the test beam and the corrected theoretical calculation value of ultimate bending moment are in good agreement with the test value, and the error is less than 5%. The preparation of concrete by desert sand instead of engineering sand can give full play to the advantages of local resources, save river sand resources, protect the ecological environment of rivers and lakes, and achieve the goal of green building.

Keywords: volume fraction of steel fiber; desert sand substitution rate; fracture regularity; bridge function; filling effect; concrete beams

收稿日期：2021-10-19; **修回日期**：2021-11-25；**录用日期**：2021-11-26；**网络首发时间**：2021-12-07 14:15:20
网络首发地址：https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211206.002
基金项目：国家自然科学基金 (51668060); 自治区高校科研计划自然科学项目 (XJEDU2017I003); 兵团科技攻关项目 (2019DB004)
通信作者：张亮亮, 硕士研究生, 研究方向为土木工程材料 E-mail: 2902337569@qq.com

引用格式：秦拥军, 张亮亮, 渠长伟, 等. 钢纤维沙漠砂混凝土梁受弯力学性能试验 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(11): 5599-5610.
QIN Yongjun, ZHANG Liangliang, QU Changwei, et al. Flexural mechanical properties of steel fiber desert sand concrete beams[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(11): 5599-5610(in Chinese).

沙漠砂是花岗岩经历物理作用(主要为风力侵蚀)和化学作用后的产物，大多为黄色，部分为褐色，粒径较小，属于特细砂或者超细砂范畴。沙漠砂混凝土(Desert sand concrete，DSC)是利用沙漠砂替代河砂作为细骨料制备而成的混凝土。国外学者 El-Sayed[1-2] 分别利用沙特阿拉伯麦加地区沙漠和埃及西部沙漠成功制备 DSC，并对 DSC 的工作性能和力学性能进行探究，试验得出随着沙漠砂含量的增加，DSC 的工作性能和抗压强度呈现下降趋势，沙漠砂替代率不宜太高(≤60%)。Luo 等[3] 对澳大利亚沙漠砂进行试验研究，得出在较低水平砂灰比下，DSC 强度与普通混凝土相当甚至更高；而在较高水平砂灰比下，DSC 强度和工作性能明显降低；Saloua[4] 成功利用撒哈拉沙漠砂制备用于生产压实 DSC，作为路面结构的基层，并得出最佳的混凝土配合比和自由收缩试验的结论。秦拥军课题组[5-7] 对塔克拉玛干沙漠砂混凝土的本构关系及无腹筋深梁的抗剪性能展开研究，为 DSC 研究提供理论依据；刘海峰等[8] 利用毛乌素沙漠砂制备混凝土，对其抗冻性能展开研究，建立了不同冻融循环次数下 DSC 本构关系；李志强课题组[9-10] 采用古尔班通古特沙漠砂混凝土制备梁构件，并对其抗弯、抗剪性能进行探究，为 DSC 在工程上的应用提供指导。综上所述，国内外学者主要以沙漠砂替代率(Desert sand replacement rate，R_{ds})、粉煤灰掺量和水胶比为主要变量来探究 DSC 性能，考虑到本试验混凝土强度为固定值(C40)，粉煤灰对混凝土的开裂有一定的影响(本文主要研究钢纤维对混凝土开裂的影响)，因此本文选用 R_{ds} 为主要变量之一。

钢纤维是用钢材经加工制成的短纤维，一般分为剪切型、冷拉型和铣削型。钢纤维混凝土(Steel fiber reinforced concrete，SFRC)是指在普通混凝土中掺入乱向分布的短钢纤维所形成的一种性能良好的新型多相复合材料。Tan 等[11] 对 SFRC 梁在剪切作用下的行为进行研究，研究证实，在普通钢筋混凝土中掺入少量钢纤维，可使抗剪强度提高 70% 以上；Jasim 等[12] 研究得出随着开口周围采用 SFRC，极限扭转弯矩增大(32%~68%)，同时扭转角提高了约 27.6%~46.7%；Rajabzadeh 等[13] 通过试验研究证明在中等延性箍筋配筋的梁中加入钢纤维比采用特殊延性抗剪钢筋的梁具有更好的性能。Akhilesh 等[14] 采用端钩型钢纤维进行试验研究，得出随着纤维掺量的增加，混凝土的力学性能呈现增加趋势而工作性能却显著下降。朱海堂等[15] 以 SFRC 厚度、钢纤维体积分数和玄武岩纤维筋配筋率为变量探究 SFRC 梁的承载力规律和破坏模式，提出了 SFRC 梁在不同破坏模式下受弯承载力和平衡配筋率的计算方法；赵秋红等[16] 通过试验研究得出加入钢纤维使梁构件受剪破坏呈明显的延性特性且完整度较好，钢纤维在材料抗剪中起主导作用；岳健广等[17] 开展了 SFRC 断裂破坏机制和受拉损伤试验研究，建立了 SFRC 受拉损伤本构模型。而王勇升[18] 在混凝土中同时加入沙漠砂和钢纤维，探究其对混凝土的力学性能和耐久性能的影响规律。综上所述，钢纤维体积掺量(Volume content of steel fiber，V_{sf})是研究 SFRC 的主要因素，因此本文选择 V_{sf} 为主要变量之一。

DSC 相对于普通混凝土，优点是在低掺量下，由于其较好的填充作用使混凝土更加密实，增加混凝土的抗压承载力和耐久性；缺点是因其比表面积较大，吸水率较高导致流动性不佳、工作性能较差、易离析且韧性不佳；当掺量>50% 时，力学性能和工作效能大幅度降低。因此 DSC 在结构工程中应用较少，多用于装饰和路基工程。而钢纤维可以明显增加混凝土的抗拉、抗剪、抗冲击、抗疲劳及耐久性性能，增加混凝土韧性。因此，本试验在 DSC 基础上，加入钢纤维旨在改善其性能。以 V_{sf}、R_{ds} 和纵筋配筋率(Reinforcement ratio，R_r)为主要变量研究钢纤维沙漠砂混凝土(Steel fiber desert sand concrete，SFDSC)梁受弯性能的影响规律。

1 试验概况

1.1 原材料

水泥来自新疆乌鲁木齐天山水泥厂生产的天山牌 P·O42.5R 普通硅酸盐水泥；细骨料为新疆地区水洗中粗砂，细度模数为 2.99，表观密度 2 487.5 kg/m^3；粗骨料为乌鲁木齐周边地区卵石，粒径为 5~20 mm 连续级配，体积密度为 2 700 kg/m^3；沙漠砂取自塔克拉玛干沙漠，采砂地点为新疆巴州轮台县塔河油田沙漠公路 62 km 处背风浮砂，平均粒径 0.963 mm，细度模数为 0.855；钢纤维来自河北衡水卓佳橡胶制品有限公司，具体参数见表 1；Q8081 聚羧酸高效减水剂(陕西秦奋建材有限公司)；浇筑和养护均为乌鲁木齐市政用水；受力钢

表 1 钢纤维尺寸及力学性能

Table 1 Steel fiber size and mechanical properties

Type	L_0/mm	L_f/mm	D_f/μm	L_0/D_f	F_{tk}/MPa
End hook type	35	38	750	46.7	1 000

Notes: L_0—Effective length; L_f—Total length; D_f—Equivalent diameter; F_{tk}—Tensile strength.

筋和构造钢筋采用 HRB400 级钢筋，箍筋采用 HPB300 级钢筋。搅拌工具为 HC-HJS60 型强制式搅拌机，最大搅拌量 0.12 m^3，建研华测科技有限公司生产。

1.2 试验梁设计

为研究不同 R_{ds} 和 V_{sf} 及 R_r 对 SFDSC 梁受弯性能的影响规律，本试验设计 11 根不同因素的受弯梁，参数见表 2。试验梁采用的混凝土强度等级为 C40，质量配合比为水泥：水：细骨料：粗骨料：减水剂=1：0.45：2.36：3.55：0.005，箍筋设计为 ϕ8@150，钢筋保护层厚度为 25 mm。按照 SFRC 制备规范进行构件浇筑，采用振动棒均匀振捣。

表 2 钢纤维沙漠砂混凝土 (SFDSC) 梁参数

Table 2 Parameters of steel fiber desert sand concrete (SFDSC) beams

Number	$b\times h$/mm^2	h_0/mm	L/mm	L_0/mm	V_{sf}/%	R_{ds}/%	L_r	R_r/%
SFDSC-0/0-0.97	150×300	259	1 800	1 500	0.0	0	2Φ16	0.97
SFDSC-0.5/20-0.97	150×300	259	1 800	1 500	0.5	20	2Φ16	0.97
SFDSC-1.0/20-0.97	150×300	259	1 800	1 500	1.0	20	2Φ16	0.97
SFDSC-1.5/20-0.97	150×300	259	1 800	1 500	1.5	20	2Φ16	0.97
SFDSC-2.0/20-0.97	150×300	259	1 800	1 500	2.0	20	2Φ16	0.97
SFDSC-0.5/40-0.97	150×300	259	1 800	1 500	0.5	40	2Φ16	0.97
SFDSC-1.0/40-0.97	150×300	259	1 800	1 500	1.0	40	2Φ16	0.97
SFDSC-1.5/40-0.97	150×300	259	1 800	1 500	1.5	40	2Φ16	0.97
SFDSC-2.0/40-0.97	150×300	259	1 800	1 500	2.0	40	2Φ16	0.97
SFDSC-1.0/40-1.23	150×300	258	1 800	1 500	1.0	40	2Φ18	1.23
SFDSC-1.0/40-1.52	150×300	257	1 800	1 500	1.0	40	2Φ20	1.52

Notes: b—Beam width; h—Beam height; h_0—Effective height; L—Beam length; V_{sf}—Volume content of steel fiber; R_{ds}—Replacement rate of desert sand; L_r—Longitudinal reinforcement; R_r—Reinforcement ratio. For example, in SFDSC-1.0/40-1.23, 1.0/40 represent the contents of steel fiber and desert sand, 1.23 represents reinforcement ratio.

1.3 试验装置和加载制度

本试验加载装置选用杭州邦威机电控制工程有限公司 MAS-500/500Q 伺服液压机，采用四点对称加载，如图 1 所示。根据 GB/T 50152—2012[19]，在正式加载前对受弯梁进行预加载，用以检验试验仪器是否正常运转及支座是否平稳。正式试验采用逐级加载的方式进行，受弯梁开裂前采用每级 5 kN 加载，第一条裂缝出现后采用每级 10 kN 加载，当加载到试验梁破坏荷载的 85%时，改为每级 5 kN 加载，直至梁发生破坏，每级荷载持荷时间为 6 min，持荷过程中用裂缝测距仪测量裂缝宽度，记录并绘制裂缝发展图。

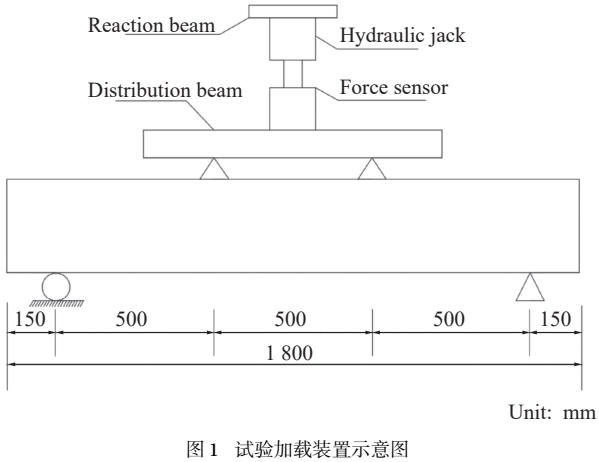

图 1 试验加载装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test loading device

2 结果与分析

2.1 SFDSC 梁的破坏过程

试验梁的破坏均为典型的弯曲型破坏。构件受弯破坏根据其损伤程度可分为四个阶段：(1) 弹性阶段，此阶段无裂缝产生。随着荷载的作用，初期原始缺陷 (微裂纹、细小孔隙) 有所改善，后期原始缺陷开始扩张或者发展成新的缺陷，为后期混凝土破坏奠定基础，混凝土产生弹性变形，钢纤维开始进入工作，直至微裂缝的萌生，标志着这一阶段结束；(2) 裂缝阶段，前期为裂缝稳定发展阶段 (微裂缝阶段)，表现为微裂缝的大量出现和迅速扩张，此阶段位移增加不是很明显，钢纤维的“微钢筋作用”抑制了宏观裂缝的产生，钢纤维和混凝土之间黏结力承担主要作用；当第一条可见裂缝出现后，构件进入后期裂缝的无序发展阶段 (宏观裂缝阶段)，表现为梁构件纯弯段

底部竖向裂缝的出现和扩张，初期随荷载增大稳定扩张和拓宽，中期伴随着斜裂缝的出现，开始进入无序增长，当裂缝贯通至构件顶部预示着终期的到来，此时的拉应力主要由钢筋和钢纤维与混凝土的“桥架作用”承担，整个阶段持续时间较长，为构件受弯破坏的重要阶段；(3) 破坏阶段，裂缝大量涌现并迅速拓宽，构件损伤急剧增加，部分钢纤维被拔出而退出工作 (图 2)，构件位移急剧增大，直至受压区混凝土被压碎，构件破坏。整个过程持续时间较短，一般在几分钟之内就可以完成；(4) 下降阶段，构件破坏后荷载急剧下降，位移突变。纯弯段底部纵筋和箍筋外露，钢纤维部分完全拔出 (图 3)，上部混凝土剥落，最大裂

图 2　部分钢纤维退出工作图

Fig. 2　Exit work diagram of partial steel fiber

图 3　破坏阶段钢筋和钢纤维状态

Fig. 3　State of steel bar and steel fiber in failure stage

缝宽度可达 2 cm 以上。此阶段主要由纵向受力钢筋、构造钢筋和箍筋形成的钢筋笼及包裹的混凝土支撑构件，使构件保持一定的完整性和承载力，不易失稳。

2.2　SFDSC 梁的破坏状态

11 根梁的 V_{sf}、R_{ds} 及 R_r 各不相同，其破坏状态有很大的差异，如图 4 所示。以梁破坏状态和

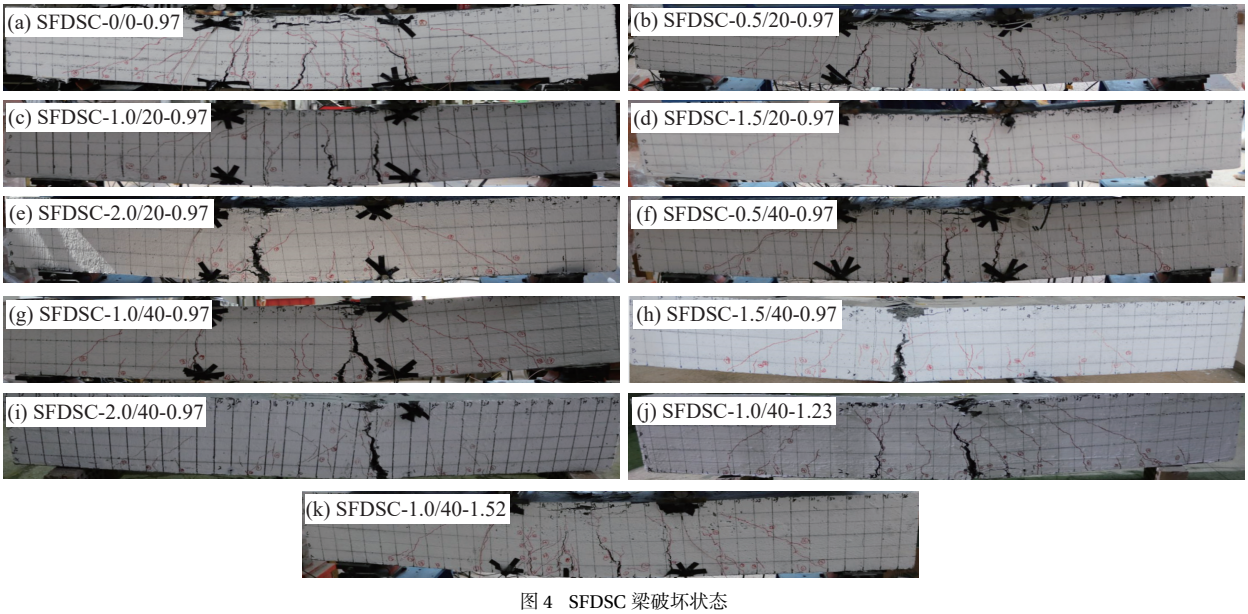

图 4　SFDSC 梁破坏状态

Fig. 4　Failure states of SFDSC beams

荷载-位移曲线来分析这三个因素的影响规律。

2.2.1 钢纤维体积掺量 V_{sf}

由图 4 可以看出，最大裂缝 (主裂缝) 都在纯弯段内，符合受弯梁破坏特征；随着 V_{sf} 的增加，裂缝数量不断减少，SFDSC-0.5/20-0.97 主裂缝既有竖向裂缝也有斜裂缝，和 SFDSC-0/0-0.97 比较相似，而 SFDSC-1.0/20-0.97、SFDSC-1.5/20-0.97、SFDSC-2.0/20-0.97 基本都是竖向裂缝，这是由于端钩型钢纤维可以增加骨料之间的咬合力 (两端的弯钩相当于钢筋在梁端的锚固，增强混凝土与钢纤维的连接，使小构件更牢固，两者能共同工作以承担各种应力)，且钢纤维的桥架作用会传递应力，延缓裂缝的发展，增强构件的整体性。即使在高荷载大裂缝下，构件也不会失稳，因此 SFRC 梁主裂缝宽度大于普通梁。从图 5 可以得出，试验梁的承载力随着 V_{sf} 的增加整体呈现增加趋势。试验梁初期位移和荷载较小，当位移 5~10 mm 时荷载急剧增大，当荷载达到极限 85% 以上时，荷载增长缓慢，位移迅速增大。钢筋应变急剧增大，快速达到屈服应变，构件进入破坏阶段。

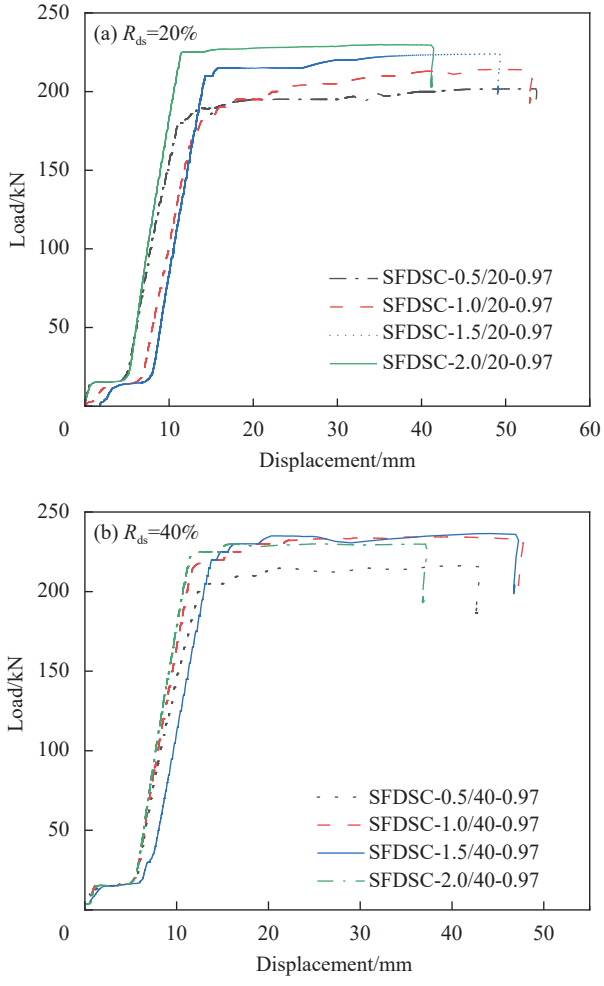

图 5 不同沙漠砂替代率 R_{ds} 时 SFDSC 梁荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curve of SFDSC beam with different desert sand replacement rate R_{ds}

2.2.2 沙漠砂替代率 R_{ds}

SFDSC-0/0-0.97、SFDSC-0.5/20-0.97、SFDSC-0.5/40-0.97 破坏状态类似，如图 4 所示，主裂缝个数相近且对称性很高，这是由于在低 V_{sf}(0.5%、1.0%) 下，影响试验梁主要是 R_{ds}，随着 R_{ds} 的增加，构件抗裂能力略有提升，但不是很明显，SFDSC-0/0-0.97、SFDSC-1.0/20-0.97、SFDSC-1.0/40-0.97 亦是如此。而在高 V_{sf}(1.5%、2.0%) 下，沙漠砂作用有限，钢纤维的“微筋作用”占主导作用；相对低 V_{sf} 其裂缝数量明显减少，但是主裂缝的宽度较大，而且对称性较差 (SFDSC-1.5/20-0.97、SFDSC-2.0/20-0.97、SFDSC-1.5/40-0.97、SFDSC-2.0/40-0.97)。沙漠砂颗粒极细，可以很好地填充粗细骨料之间的孔隙，使构件更加密实，增强混凝土抗压特性，而受弯梁因受压区混凝土被压碎而最终破坏。因此随着 R_{ds} 的增加 (低掺量)，受弯梁的极限荷载不断增大，如图 6 所示。在 V_{sf} 恒定下，位移随 R_{ds} 的增加，呈现先增加后减小趋势。

2.2.3 纵筋配筋率 R_r

配筋率是影响试验梁受弯承载力的主要因素之一，SFDSC-1.0/40-0.97、SFDSC-1.0/40-1.23、SFDSC-1.0/40-1.52 裂缝发展规律比较类似，如图 4 所示，裂缝基本呈对称性分布；相对于 SFDSC-1.0/40-0.97、SFDSC-1.0/40-1.23、SFDSC-1.0/40-1.52，主裂缝宽度较小，但裂缝数量明显增加。主要是由于配合比保持恒定，混凝土表面极限应变基本不变，而 SFDSC-1.0/40-1.23 和 SFDSC-1.0/40-1.52 承受的极限荷载 (图 7) 高于 SFDSC-1.0/40-0.97，因此当荷载大于 SFDSC-1.0/40-0.97 极限荷载时，混凝土表面会出现新的裂缝。从图 7 可以看出，SFDSC-1.0/40-0.97、SFDSC-1.0/40-1.23 极限荷载相近，而 SFDSC-1.0/40-1.52 与其相差很大。这是由于 SFDSC-1.0/40-1.52 相对于 SFDSC-1.0/40-0.97、SFDSC-1.0/40-1.23 配筋率分别提高了 56.7%、23.6%，虽然钢纤维在一定程度上相当于微钢筋，可以在一定程度上提高配筋率，这也是 SFDSC-1.0/40-0.97、SFDSC-1.0/40-1.23 差距较小的主要原因，但当配筋率大幅度增加时，钢纤维所起的作

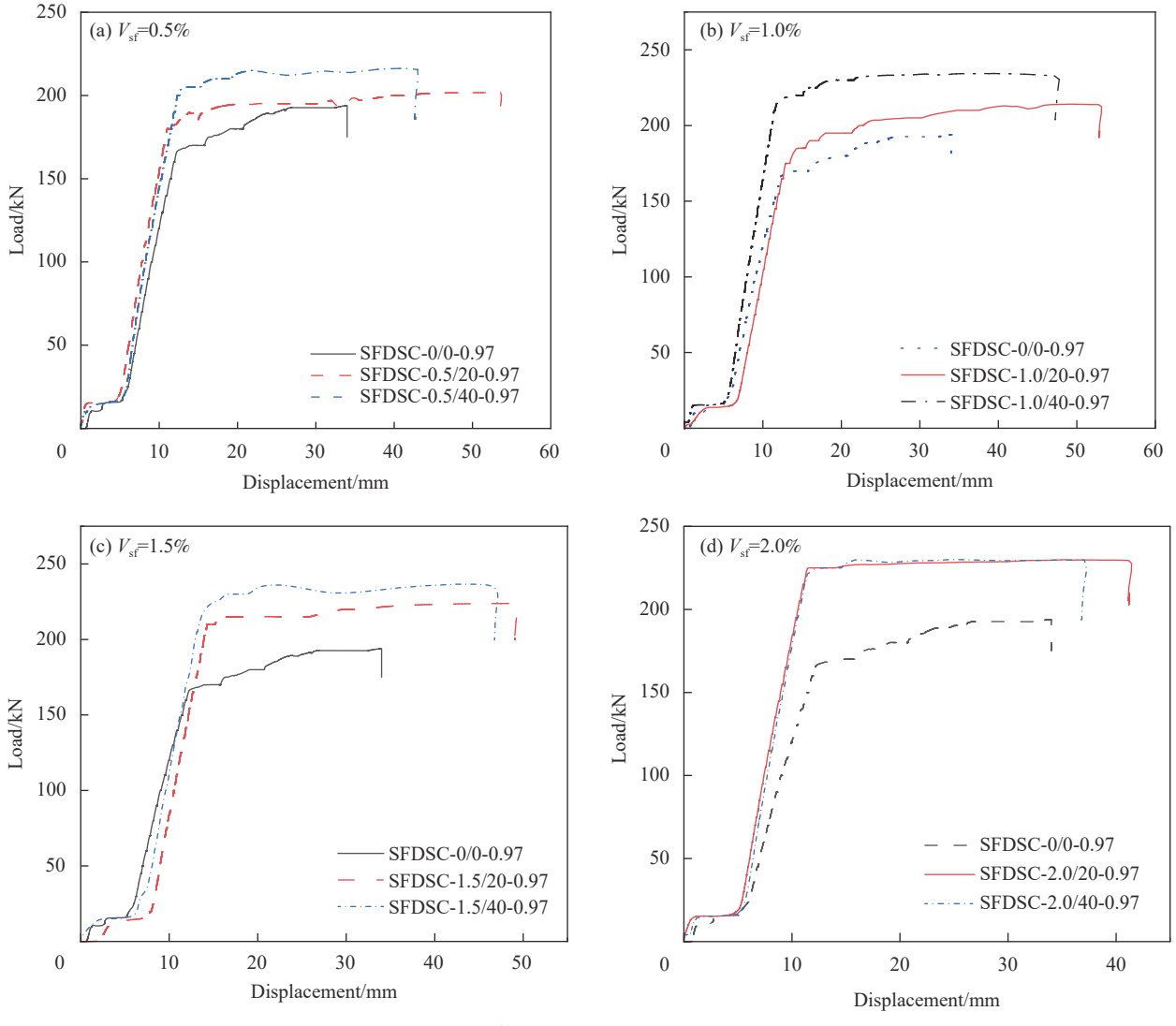

图 6　不同钢纤维体积掺量 V_{sf} 时 SFDSC 梁荷载-位移曲线

Fig. 6　Load-displacement curve of SFDSC beam with different volume content of steel fiber V_{sf}

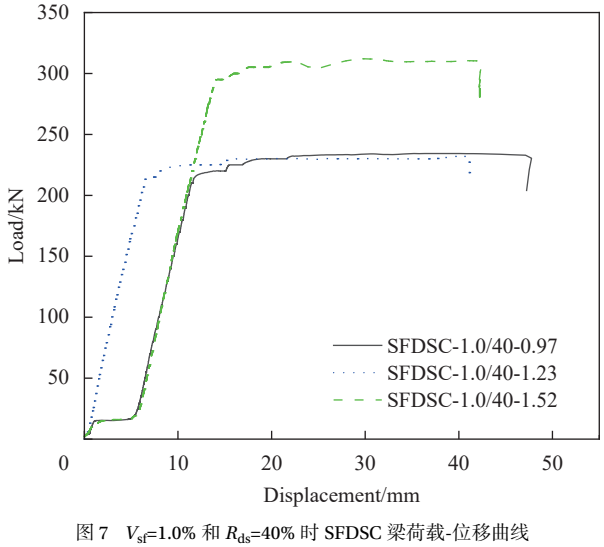

图 7　V_{sf}=1.0% 和 R_{ds}=40% 时 SFDSC 梁荷载-位移曲线

Fig. 7　Load-displacement curve of SFDSC beam with V_{sf}=1.0% and R_{ds}=40%

用将减弱。

SFDSC-1.5/20-0.97、SFDSC-2.0/20-0.97、SFDSC-1.0/40-0.97、SFDSC-2.0/40-0.97 虽然主裂缝不在纯弯段的正中间，但都在纯弯段区域内。究其原因，随着 V_{sf} 的增加，乱向分布的钢纤维在某一区域内小程度的聚集导致临近区域 V_{sf} 在一定程度上有所降低，在荷载作用下，产生应力集中或者改变应力传递路径，从而导致主裂缝位置发生偏移(小范围)。

荷载-位移曲线在初始阶段出现小范围的水平段，这是由于分配梁和滚轴支座属于金属材料，较光滑，在持荷状态下，产生相对滑移，荷载持续增大。但对梁的承载力和破坏状态影响非常小，可以忽略不计。

2.3 SFDSC 梁基本力学性能

制作梁构件时，同时预留 2 组，即 6 个标准立方体试块 (150 mm×150 mm×150 mm)，在相同条件下养护 28 天，进行抗压强度和劈裂抗拉强度的测试[20-21]。普通混凝土的抗拉强度标准值 f_{tk} 和弹性模量 E_c、SFRC 的抗拉强度标准值 f_{ftk} 和弹性模量 E_{sfrc} 分别按下列各式[20, 22-23] 计算，计算结果如表 3 所示：

$$E_c = \frac{10^5}{2.2 + \dfrac{34.7}{f_{cu,k}}} \tag{1}$$

$$f_{tk} = 0.9 f_{sp,k} \tag{2}$$

$$E_{sfrc} = 21.5 \times 10^3 \left(\frac{f_{fcm}}{10}\right)^{1/3} \tag{3}$$

$$f_{ftk} = f_{tk}(1 + \alpha_t \lambda_f) \tag{4}$$

$$\lambda_f = V_{sf} L_f / d_f \tag{5}$$

式中：$f_{cu,k}$ 为普通混凝土立方体抗压强度的标准值；$f_{sp,k}$ 为普通混凝土立方体劈裂抗拉强度的标准值；f_{fcm} 为 SFRC 轴心抗压强度的平均值；按 f_{fcm}=0.8f_{fcum}[17] 换算求得，f_{fcum} 为 SFRC 立方体抗压强度的平均值；α_t为钢纤维对混凝土抗拉强度的影响系数，本文取 0.76；λ_f为钢纤维含量特征值；L_f 为最大长度；d_f 为有效直径。

表 3 SFDSC 梁基本力学性能和开裂荷载

Table 3 Basic mechanical properties and cracking load of SFDSC beams

Number	f_{cc}/MPa	f_{ts}/MPa	f_{tk}(f_{ftk})/MPa	E_c(E_{sfrc})/GPa	P_{cr}/kN	M_{cr}/(kN·m)	M_{cr0}/(kN·m)	M_{cr}/M_{cr0}
SFDSC-0/0-0.97	46.00	4.21	3.79	33.85	44.75	11.19	10.79	1.037
SFDSC-0.5/20-0.97	52.67	5.27	5.02	34.73	51.09	12.77	12.84	0.995
SFDSC-1.0/20-0.97	56.79	6.63	5.83	35.61	59.95	14.99	14.86	1.009
SFDSC-1.5/20-0.97	52.12	7.94	6.64	34.60	67.05	16.76	16.98	0.987
SFDSC-2.0/20-0.97	50.45	8.19	7.45	34.23	76.36	19.09	19.07	1.001
SFDSC-0.5/40-0.97	58.71	6.16	5.02	36.01	50.37	12.59	12.78	0.985
SFDSC-1.0/40-0.97	55.64	7.09	5.83	35.37	60.00	15.00	14.87	1.009
SFDSC-1.5/40-0.97	53.82	8.26	6.64	34.98	78.26	19.57	16.96	1.154
SFDSC-2.0/40-0.97	52.87	8.92	7.45	34.77	76.24	19.06	19.04	1.001
SFDSC-1.0/40-1.23	55.32	7.15	5.83	35.30	59.99	15.00	15.38	0.975
SFDSC-1.0/40-1.52	55.46	7.06	5.83	35.33	64.33	16.08	15.99	1.006

Notes: f_{cc}—Cube compressive strength; f_{ts}—Cube splitting tensile strength; f_{tk}—Standard value of tensile strength of ordinary concrete; f_{ftk}—Standard value of tensile strength of steel fiber desert sand concrete; E_c—Elastic modulus of ordinary concrete; E_{sfrc}—Elastic modulus of steel fiber desert sand concrete; P_{cr}—Cracking load; M_{cr}—Experimental value of bending beam cracking load; M_{cr0}—Theoretical calculation value of bending beam cracking load.

2.4 SFDSC 梁承载力

2.4.1 开裂荷载

开裂荷载是受拉区边缘纤维的应变值达到混凝土受弯时的极限应变所对应的荷载值，它是划分受弯构件正截面第 I 阶段和第 II 阶段重要的参数。由于混凝土的非线性和第 I 阶段受力的复杂性，目前有关开裂荷载的计算公式相对较少。为能准确可靠对 SFDSC 梁进行评估，本文参考学者管巧艳[24] 的理论，并结合具体试验状况，采用以下各式进行计算，计算结果如表 3 所示：

$$M_{fcr} = \gamma_m f_{ft} W_{f0} \tag{6}$$

$$W_{f0} = \frac{I_{f0}}{h - y_0} \tag{7}$$

$$I_{f0} = \frac{1}{3} b y_0^3 + \frac{1}{3} b (h - y_0)^3 + A_s(\alpha_E - 1)(h_0 - y_0)^2 \tag{8}$$

$$y_0 = \frac{\dfrac{1}{2} b h^2 + A_s h_0 (\alpha_E - 1)}{b h + A_s(\alpha_E - 1)} \tag{9}$$

$$\alpha_E = \frac{E_s}{E_c} \tag{10}$$

$$f_{ft} = f_t(1 + \alpha_t \lambda_f) \tag{11}$$

式中：M_{fcr}为开裂弯矩；γ_m为混凝土构件的截面抵抗矩塑性影响系数基本值，取 1.55；f_{ft}为 SFRC 抗拉强度的设计值；W_{f0}为 SFRC 梁折算截面对受拉边缘的弹性抵抗矩；I_{f0}为 SFRC 梁换算截面的惯性矩；A_s为受拉区纵向普通钢筋的截面面积；E_c为混凝土弹性模量，按表 3 选取；E_s为钢筋弹性模量；b 为梁截面宽度；h 为梁截面高度；h_0 为梁截面有效高度。

试验梁受弯开裂荷载试验值和采用式 (6) 计算

值比值的平均值为 1.014，方差为 0.002，误差小于 5%，试验结果与计算结果吻合较好。由表 3 可以看出，SFDSC 梁的开裂荷载均高于普通混凝土梁，体现出钢纤维和沙漠砂的良好增韧效果。当 R_{ds}=20%、V_{sf} 为 0.5%~2.0% 时，受弯梁的开裂弯矩 M_{cr} 增加了 49.5%，平均增速 16.5%；当 V_{sf} = 0.5%~2.0%、R_{ds} 为 20%~40% 时，M_{cr} 平均增加了 4.2%，<<49.5%；而纵筋配筋率的变化对 M_{cr} 影响不大；所以在增韧效果上钢纤维优于沙漠砂和纵筋配筋率。当 V_{sf}=1.0%、R_{ds}=40% 时，M_{cr} 最大，增韧效果最好。

2.4.2　承载力

按照 GB/T 50152—2012[19] 进行 SFDSC 梁受弯试验，试验结果如表 4 所示。为探究本试验的可靠性，利用相关规范进行同条件受弯梁的理论计算。先采用双筋 (考虑构造钢筋的影响) 矩形截面受弯构件正截面受弯承载力计算，根据 GB/T 50010—2010[25] 普通混凝土梁可按下列两式进行计算：

$$M = \alpha_1 f_c bx\left(h_0 - \frac{x}{2}\right) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) \tag{12}$$

$$\alpha_1 f_c bx = f_y A_s - f'_y A'_s \tag{13}$$

根据 CECS 38: 2004[23]，SFRC 梁可按下列各式进行计算：

$$M_{fu} = f_{fc} bx\left(h_0 - \frac{x}{2}\right) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) - f_{ftu} bx_t\left(\frac{x_t}{2} - a\right) \tag{14}$$

$$f_{fc} bx = f_y A_s - f'_y A'_s + f_{ftu} bx_t \tag{15}$$

$$f_{ftu} = f_t \beta_{tu} \lambda_f \tag{16}$$

$$x_t = h - \frac{x}{\beta_1} \tag{17}$$

式中：α_1为系数，取 1.0；f_c为混凝土轴心抗压强度设计值；x 为混凝土受压区高度；f_y、f'_y为普通钢筋抗拉、抗压强度设计值；a'_s为受压区纵向普通钢筋合力点至截面受压边缘的距离，取 39 mm；A'_s为受压区纵向普通钢筋的截面面积；f_{fc}为钢纤维混凝土轴心抗压强度设计值；a为纵向受拉钢筋合力点主截面至受拉边缘的距离，取 41 mm；f_{ftu}为受拉区 SFRC 等效矩形应力图形的抗拉强度；x_t为受拉区等效应力图形高度；β_{tu}为钢纤维对钢筋钢纤维混凝土构件正截面受拉区 SFRC 抗拉作用的影响系数，取 1.30；β_1为系数，取 0.8；f_t为混凝土轴心抗拉强度设计值；M 为普通混凝土梁受弯最大弯矩；M_{fu} 为钢纤维混凝土梁受弯最大弯矩。

依据式 (13)、(15) 计算的受压区高度 $x<2a'$(a'为受压区全部纵向钢筋合力点至截面受压边缘的距离，取 39 mm)，则不考虑受压区钢筋对受弯梁承载力的影响。对式 (12)~(15) 进行修正得到下列各式：

$$M = \alpha_1 f_c bx\left(h_0 - \frac{x}{2}\right) \tag{18}$$

$$\alpha_1 f_c bx = f_y A_s \tag{19}$$

$$M_{fu} = f_{fc} bx\left(h_0 - \frac{x}{2}\right) - f_{ftu} bx_t\left(\frac{x_t}{2} - a\right) \tag{20}$$

$$f_{fc} bx = f_y A_s + f_{ftu} bx_t \tag{21}$$

由式 (19)、(21) 计算得出的受压区高度 $x \leqslant \xi_b h_0$(ξ_b 为相对界限受压区高度，取 0.518)，满足要求，计算结果如表 4 所示。

可以看出，SFDSC 梁相对于普通混凝土梁其承载力增加了 4%~22%，试验梁受弯承载力的试验值与计算值之比的平均值为 1.266，方差为 0.008，试验值和理论计算值吻合不是特别好，理

表 4　SFDSC 梁承载力实测值与计算值及修正理论值比较

Table 4　Comparison of measured and calculated bearing capacity and modified theoretical values of SFDSC beams

Number	P_{max}/kN	M_u/(kN·m)	M_{u0}/(kN·m)	M_u/M_{u0}	M'/(kN·m)	M_u/M'
SFDSC-0/0-0.97	194.01	48.50	34.74	1.396	47.04	1.031
SFDSC-0.5/20-0.97	201.77	50.44	39.16	1.288	50.83	0.992
SFDSC-1.0/20-0.97	214.11	53.53	43.21	1.239	56.09	0.954
SFDSC-1.5/20-0.97	223.89	55.97	46.99	1.191	60.99	0.918
SFDSC-2.0/20-0.97	229.90	57.48	50.46	1.139	65.50	0.878
SFDSC-0.5/40-0.97	216.25	54.06	39.16	1.381	48.64	1.112
SFDSC-1.0/40-0.97	234.35	58.59	43.21	1.356	53.67	1.092
SFDSC-1.5/40-0.97	236.51	59.13	46.99	1.258	58.36	1.013
SFDSC-2.0/40-0.97	229.99	57.50	50.46	1.139	62.67	0.917
SFDSC-1.0/40-1.23	241.91	60.48	50.37	1.201	62.56	0.967
SFDSC-1.0/40-1.52	312.09	78.02	58.17	1.341	72.25	1.080

Notes: P_{max}—Maximum load; M_u—Experimental value of ultimate load of bending beam; M_{u0}—Theoretical calculation value of ultimate load of bending beam; M'—Modified theoretical calculation value of ultimate load of bending beam.

论计算值显保守。考虑到沙漠砂的影响，利用 Origin 进行数值拟合，如图 8 所示。令 K 为沙漠砂影响系数，则

$$K = -0.0028R_{ds} + 1.354,\quad M' = KM \tag{22}$$

式中：M'为考虑沙漠砂影响理论弯矩。

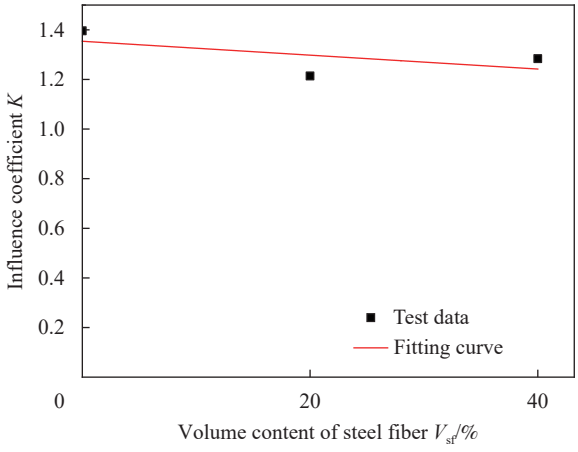

图 8　考虑到 R_{ds} 的 SFDSC 梁拟合曲线

Fig. 8　Fitting curve of SFDSC beams considering R_{ds} steel fiber

结果如表 4 所示。平均值为 0.996，方差为 0.005%，拟合效果较好。表明沙漠砂对试验梁的受弯承载力有一定的贡献。

2.5　SFDSC 梁短期刚度和挠度

目前关于 DSC 梁的规范较少，而普通混凝土梁与试验梁的差异比较明显，而且在对于 SFDSC 梁整体性的贡献上，沙漠砂稍逊于钢纤维，因此本文采用 SFRC 规范。根据 CECS 38: 2004[23]，受拉区出现裂缝 SFRC 矩形截面受弯构件可以采用下列各式进行计算，计算结果如表 5 所示：

$$B_{fs} = B_s(1 + \beta_B \lambda_f) \tag{23}$$

$$B_s = \frac{E_s A_s h_0^2}{1.15\psi + 0.2 + \dfrac{6\alpha_E \rho}{1 + 3.5\gamma_f}} \tag{24}$$

$$\psi = 1.1 - 0.65\frac{f_{tk}}{\rho_{te}\sigma_s} \tag{25}$$

$$\rho_{te} = \frac{A_s}{A_{te}} \tag{26}$$

式中：B_{fs} 为 SFRC 受弯构件的短期刚度；B_s 为钢筋混凝土构件的短期刚度；β_B为钢纤维对钢筋钢纤维混凝土受弯构件短期刚度的影响系数，取 0.35；ψ 为裂缝间纵向受拉普通钢筋应变不均匀系数：σ_s为按荷载准永久组合计算的钢筋混凝土构件纵向受拉普通钢筋应力；γ_f 为受拉翼缘截面面积与腹板有效截面面积的比值，矩形截面取 0；

表 5　SFDSC 梁刚度和挠度

Table 5　Stiffness and deflection of SFDSC beams

Number	B_{fs}/(N·mm^2)	f/mm	f_0/mm	f_0/f
SFDSC-0/0-0.97	4 541 586 912 613	2.56	2.81	1.098
SFDSC-0.5/20-0.97	4 982 743 668 953	2.43	2.77	1.142
SFDSC-1.0/20-0.97	5 430 396 736 648	2.36	2.71	1.147
SFDSC-1.5/20-0.97	5 788 406 359 728	2.32	2.60	1.122
SFDSC-2.0/20-0.97	6 172 974 602 027	2.23	2.49	1.116
SFDSC-0.5/40-0.97	5 037 073 861 873	2.57	2.75	1.069
SFDSC-1.0/40-0.97	5 419 431 759 144	2.59	2.81	1.085
SFDSC-1.5/40-0.97	5 807 600 578 386	2.44	2.67	1.094
SFDSC-2.0/40-0.97	6 202 500 910 678	2.22	2.50	1.125
SFDSC-1.0/40-1.23	5 901 305 918 417	2.46	2.73	1.112
SFDSC-1.0/40-1.52	6 475 097 572 356	2.89	3.00	1.039

Notes: f—Experimental value of bending beam deflection; f_0—Theoretical calculation value of bending beam deflection; B_{fs}—Short-term stiffness of bending beam.

ρ_{te}按有效受拉混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋配筋率；A_{te}为有效受拉混凝土截面面积，取 A_{te}=0.5bh；ρ为纵向受拉钢筋的配筋率，取ρ=A_s/bh_0。

假定试验梁为匀质弹性材料构件，则可以采用材料力学的方法[24]和本试验的具体状况对构件跨中最大挠度进行计算，即下式所示，计算结果如表 5 所示：

$$f = S\frac{Ml^2}{B_{fs}} \tag{27}$$

式中：f 为跨中最大挠度；l 为梁的计算跨度，取 1 500 mm；S 为系数，取 0.1065。

当 V_{sf} (0.5%~2.0%) 增加时，B_{fs} 不断增加，R_{ds}=20% 时增幅为 23.9%，R_{ds}=40% 时增幅为 23.1%；而 R_{ds} 从 20% 增加到 40%，B_{fs} 平均增幅为 0.72%；R_r 由 0.97% 增加至 1.52%，增幅为 19.5%，所以影响受弯梁短期刚度的主要因素为 V_{sf} 和 R_r。试验梁理论跨中挠度 $(f_0)/f$平均值为 1.105，方差为 0.009，试验值和计算值比较吻合。试验值略大于计算值，但是试验值均没有超过国家规定标准，假定试验梁为匀质弹性材料构件有些保守。影响梁构件挠度主要因素为构件的刚度和荷载的大小。

2.6　其他梁构件力学性能预测

通过上文的研究发现，试验梁的力学性能试验值和理论计算值 (或修正后理论计算值) 吻合效果较好，利用归纳推理法，可以合理预测设计条件相同而客观条件没有实现的其他梁构件的力学性能。试验梁的参数条件如表 6 所示，利用式 (1)、(3)、(6)、(19)、(22)、(23)、(27) 等对其进行理论计算，计算结果如表 7 所示。

表 6　SFDSC 待测梁的参数

Table 6　Parameters of SFDSC beam to be tested

Number	$b\times h$/mm^2	h_0/mm	L_0/mm	V_{sf}/%	R_{ds}/%	R_r/%	f_{cc}/MPa	f_{ts}/MPa
SFDSC-0/40-0.97	150×300	259	1 500	0.0	40	0.97	47.4	4.49
SFDSC-0.5/60-0.97	150×300	259	1 500	0.5	60	0.97	51.1	6.62
SFDSC-1.0/60-0.97	150×300	259	1 500	1.0	60	0.97	50.0	6.60
SFDSC-1.5/60-0.97	150×300	259	1 500	1.5	60	0.97	48.6	6.62
SFDSC-2.0/60-0.97	150×300	259	1 500	2.0	60	0.97	48.1	7.30

表 7　SFDSC 待测梁的力学性能

Table 7　Mechanical properties of SFDSC beams

Number	$E_c(E_{sfrc})$/GPa	M_{cr}/(kN·m)	M'/(kN·m)	B_{fs}/(N·mm^2)	f/mm
SFDSC-0/40-0.97	34.11	11.48	43.26	4 552 305 379 540	2.28
SFDSC-0.5/60-0.97	34.38	12.83	46.42	4 967 398 655 727	2.24
SFDSC-1.0/60-0.97	34.13	14.92	51.26	5 361 077 255 435	2.29
SFDSC-1.5/60-0.97	33.81	17.01	55.69	5 747 548 606 608	2.32
SFDSC-2.0/60-0.97	33.69	19.09	59.83	6 142 795 102 906	2.33

对比表 2、表 3 和表 6，不难发现，SFDSC-0/40-0.97 和 SFDSC-0/0-0.97 其他参数都相同，唯一的变量是 R_{ds}，由数学上变量与函数的关系，可以得出影响这两根梁承载力的主要因素是 R_{ds}，而由式 (21) 得出 R_{ds} 和试验梁承载力呈现负相关，因此 SFDSC-0/40-0.97 的理论承载力相对于 SFDSC-0/0-0.97 有所降低。SFDSC-0.5/20-0.97、SFDSC-1.0/20-0.97、SFDSC-1.5/20-0.97、SFDSC-2.0/20-0.97、SFDSC-0.5/40-0.97、SFDSC-1.0/40-0.97、SFDSC-1.5/40-0.97、SFDSC-2.0/40-0.97、SFDSC-0.5/60-0.97、SFDSC-1.0/60-0.97、SFDSC-1.5/60-0.97、SFDSC-2.0/60-0.97，当 R_{ds}=20%、40% 时，随着 V_{sf}(0.5%~2.0%) 增加，SFDSC 立方体抗压强度呈现整体降低趋势，而劈裂抗拉强度却不断增大，体现出钢纤维良好的增韧效果；当 R_{ds}=60% 时也呈现出同样的规律，因此利用 SFDSC-0.5/20-0.97、SFDSC-1.0/20-0.97、SFDSC-1.5/20-0.97、SFDSC-2.0/20-0.97、SFDSC-0.5/40-0.97、SFDSC-1.0/40-0.97、SFDSC-1.5/40-0.97、SFDSC-2.0/40-0.97 预测 SFDSC-0.5/60-0.97、SFDSC-1.0/60-0.97、SFDSC-1.5/60-0.97、SFDSC-2.0/60-0.97 有据可依。由表 7 可以看出，R_{ds}=60% 时，随着 V_{sf} 增加 E_{sfrc} 呈现降低趋势；而 M_{cr}、M' 和 B_{fs} 都呈现不断上升趋势；f 整体波动较小；这和表 3~表 5 所呈现的规律相一致，因此预测值具有一定的参考价值。

对比表 4 和表 7 可以看出，随着 R_{ds} 的增加，SFDSC 梁抗弯承载力整体呈现先增加后降低趋势，R_{ds}=40% 时的 DSC 梁承载力达到最大，因此适量沙漠砂掺量可以提高混凝土抗压强度，也可以提高受弯梁的承载力。综上所述，本文以 R_{ds}=40% 为最佳掺量。

3　结 论

(1) 钢纤维沙漠砂混凝土 (SFDSC) 梁的破坏过程分为弹性阶段、裂缝阶段、破坏阶段和下降阶段，和普通混凝土梁正截面受弯破坏过程类似，普通混凝土梁的一些规律同样适用于 SFDSC 梁，且 SFDSC 梁相对于普通混凝土梁其承载力增加了 4%~22%。

(2) 钢纤维体积掺量 V_{sf}、沙漠砂替代率 R_{ds} 和配筋率 R_r 影响受弯梁的破坏状态和性能的主要因素，主要表现为 V_{sf} 增加，裂缝数量减少，主裂缝宽度增加，不规则性增大，极限承载力整体呈现增加趋势；R_{ds} 增加，裂缝分布基本相似，破坏程度略有加剧，极限承载力增加，位移呈现先增加后减小的趋势；R_r 增加，裂缝数量增加，但破坏程度呈现降低趋势，极限荷载增加明显，位移整体呈减小趋势。从总体上看，对于试验梁的影响因素中 $R_r \geqslant V_{sf} \geqslant R_{ds}$。

(3) 试验梁开裂荷载、极限弯矩、短期刚度和跨中挠度计算值和试验值吻合效果比较好，可以为钢纤维混凝土 (SFRC) 和沙漠砂 (DSC) 理论发展提供一定的指导，也为混凝土增韧理论提供支持。利用理论计算对几何参数相同设计参数类似而客观上未试验的待测梁进行受弯力学性能预测。可以为 SFDSC 工程设计及损伤评估提供理论依据。

(4) 沙漠砂替代工程用砂制备混凝土，并掺入

钢纤维增韧，性能普遍优于钢筋混凝土。不仅可以推动沙漠砂在工程上的应用，也为绿色建筑的发展提供一个新的方向。

参考文献：

[1] EI-SAYED S A S, ABDULLAH R S, BADER A H H, et al. Experimental study on the utilization of dune sands as a construction material in the area between Jeddah and Mecca, Western Saudi Arabia[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment，2016，75(3)：1007-1022.

[2] EI-SAYED S A S. Assessing the engineering properties of concrete made with fine dune sands: An experimental study[J]. Arabian Journal of Geosciences，2013，6(3)：857-863.

[3] LUO F J, HE L, PAN Z, et al. Effect of very fine particles on workability and strength of concrete made with dune sand[J]. Construction and Building Materials，2013，47：131-137.

[4] SALOUA E E K. Compacted dune sand concrete for pavement applications[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials，2011，164(2)：87-93.

[5] 秦拥军, 张亮亮, 崔壮, 等. 沙漠砂混凝土轴心受压应力-应变曲线试验分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(10)：4184-4190.
QIN Yongjun, ZHANG Liangliang, CUI Zhuang, et al. Experimental analysis of stress-strain curve of desert sand concrete under axial compression[J]. Science, Technology and Engineering，2021，21(10)：4184-4190(in Chinese).

[6] 秦拥军, 李向阳, 王博, 等. 塔克拉玛干沙漠砂混凝土单轴受压试验[J]. 中国科技论文, 2021, 16(8)：803-807.
QIN Yongjun, LI Xiangyang, WANG Bo, et al. Uniaxial compression test of sand concrete in Taklimakan desert[J]. Chinese Science and Technology Paper，2021，16(8)：803-807(in Chinese).

[7] 秦拥军, 李向阳, 崔壮, 等. 无腹筋沙漠砂混凝土深梁抗剪性能研究[J]. 工业建筑, 2021, 51(9): 98-105.
QIN Yongjun, LI Xiangyang, CUI Zhuang, et al. Research on shear perfor-mance of deep beams without web reinforcement desert sand concrete[J]. Industrial Buildings, 2021, 51(9): 98-105(in Chinese).

[8] 刘海峰, 马映昌, 张润奇, 等. 冻融环境下沙漠砂对混凝土轴心受压力学性能的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(3)：101-109, 117.
LIU Haifeng, MA Yingchang, ZHANG Runqi, et al. Effect of desert sand on mechanical properties of concrete under axial compression under freeze-thaw environment[J]. Journal of Harbin Institute of Technology，2021，53(3)：101-109, 117(in Chinese).

[9] 李志强, 杨森, 曾晓云, 等. 沙漠砂混凝土梁抗剪性能研究[J]. 应用力学学报, 2020, 37(5)：2134-2140, 2329.
LI Zhiqiang, YANG Sen, ZENG Xiaoyun, et al. Research on shear performance of desert sand concrete beams[J]. Journal of Applied Mechanics，2020，37(5)：2134-2140, 2329(in Chinese).

[10] 李志强, 杨森, 王国庆, 等. 沙漠砂混凝土梁抗弯性能研究[J]. 应用力学学报, 2019, 36(4)：931-938, 1002-1003.
LI Zhiqiang, YANG Sen, WANG Guoqing, et al. Research on flexural behavior of desert sand concrete beams[J]. Journal of Applied Mechanics，2019，36(4)：931-938, 1002-1003(in Chinese).

[11] TAN K H, MURUGAPPAN K, PARAMASIVAM P. Shear behavior of steel fiber reinforced concrete beams[J]. Structural Journal，1993，90(1)：102-109.

[12] JASIM M H, AL-SALIM N. Enhancement behavior of reinforced concrete beam with transverse holes under combined twisting and bending using steel fiber[J]. Journal of Physics: Conference Series，2021，1973(1)：012027.

[13] RAJABZADEH G H, CELIKAG M, AKBARZADEH B H. Experimental investigation of steel fibers effect on the cyclic behavior of flexural members with moderate ductility[J]. Structures，2021，34：2530-2543.

[14] AKHILESH C, SHIV K Y. Experimental study on crack resistance of steel fiber reinforced concrete[J]. Journal of Progress in Civil Engineering，2021，3(7)：89-97.

[15] 朱海堂, 程晟钊, 高丹盈, 等. BFRP筋钢纤维高强混凝土梁受弯承载力试验与理论[J]. 复合材料学报, 2018, 35(12)：3313-3323.
ZHU Haitang, CHENG Shengzhao, GAO Danying, et al. Test and theory of flexural capacity of steel fiber reinforced high strength concrete beams reinforced with BFRP bars[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2018，35(12)：3313-3323(in Chinese).

[16] 赵秋红, 董硕, 朱涵. 钢纤维-橡胶/混凝土抗剪性能试验[J]. 复合材料学报, 2020, 37(12)：3201-3213.
ZHAO Qiuhong, DONG Shuo, ZHU Han. Shear performance test of steel fiber-rubber/concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2020，37(12)：3201-3213(in Chinese).

[17] 岳健广, 夏月飞, 方华. 钢纤维混凝土断裂破坏机理及受拉损伤本构试验研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(2)：93-106.
YUE Jianguang, XIA Yuefei, FANG Hua. Fracture failure mechanism and tensile damage constitutive test of steel fiber reinforced concrete[J]. Journal of Civil Engineering，2021，54(2)：93-106(in Chinese).

[18] 王勇升. 钢纤维、橡胶粉对沙漠砂混凝土力学性能及耐久性的试验研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2013.
WANG Yongsheng. Experimental study on the mechanical

properties and durability of desert sand concrete by steel fiber and rubber powder[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2013(in Chinese).

[19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Concrete structure test method standard: GB/T 50152—2012[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2012(in Chinese).

[20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard test method for physical and mechanical properties of concrete: GB/T 50081—2019[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2019(in Chinese).

[21] 大连理工大学. 纤维混凝土试验方法标准: CECS 13—2009[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
Dalian University of Technology. Standard test methods for fiber reinforced concrete: CECS 13—2009[S]. Beijing: China Plan Press, 2010(in Chinese).

[22] International Federation for Structural Concrete. Fib model code for concrete structures: CEB-FIP 2010[S]. Switzerland: International Federation for Structural Concrete, 2013.

[23] 大连理工大学. 纤维混凝土结构技术规程: CECS 38—2004[S]. 北京: 中国计划出版社, 2004.
Dalian University of Technology. Technical specification for fiber reinforced concrete structures: CECS 38—2004[S]. Beijing: China Plan Press, 2004(in Chinese).

[24] 管巧艳. 钢筋钢纤维高强混凝土梁受弯性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2005.
GUAN Qiaoyan. Study on flexural behavior of steel fiber reinforced high strength concrete beams[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2005(in Chinese).

[25] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB/T 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB/T 50010—2010[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2010(in Chinese).