

钢纤维与椰壳纤维对混凝土力学性能影响分析

张敏 邓娜 郑洪祥 覃曦 覃潞 高辉 代超月 邓海波 陈奕阳
成都工业学院土木工程系, 四川 成都 611730

[摘要]为对比钢纤维与椰壳纤维对混凝土力学性能影响的差异,明晰其作用规律、最优掺量及适用范围,为工程纤维选型与配合比优化提供支撑,开展9组力学试验。运用变量控制法,设计钢纤维体积掺量(0%、0.5%、0.75%、1.0%、1.5%)与椰壳纤维体积掺量(0%、0.3%、0.5%、0.75%、1.0%),每组制备3个平行试块;通过150mm×150mm×150mm立方体试块测定抗压、劈裂抗拉强度,采用100mm×100mm×400mm试块测定三点弯抗折强度,试块按照GB/T50081—2019标准养护28d后进行测试。结果表明:钢纤维最优掺量1.0%~1.5%,此时,抗压、劈裂抗拉、抗折强度相较基准组分别提高14.3%~16.3%、14.2%~19.2%、31%~61.9%;椰壳纤维最优掺量为0.3%,对应强度分别提升7.6%、8.6%、14.3%,超过此体积掺量,性能出现下降;钢纤维在抗拉、抗折增强方面的效果分别是椰壳纤维的2.6倍、4倍。钢纤维适用于高强度高韧性构件,椰壳纤维适用于低成本环保场景,两类纤维均存在最佳掺量阈值。

[关键词]混凝土; 钢纤维; 椰壳纤维; 力学性能

DOI: 10.33142/ect.v3i11.18345 中图分类号: TU528 文献标识码: A

Analysis of the Influence of Steel Fiber and Coconut Shell Fiber on the Mechanical Properties of Concrete

ZHANG Min, DENG Na, ZHENG Hongxiang, QIN Xi, QIN Lu, GAO Hui, DAI Chaoyue, DENG Haibo, CHEN Yiyang
Department of Civil Engineering, Chengdu Technological University, Chengdu, Sichuan, 611730, China

Abstract: In order to compare the differences in the effects of steel fiber and coconut shell fiber on the mechanical properties of concrete, clarify their laws of action, optimal dosage, and scope of application, and provide support for the selection of engineering fibers and the optimization of mix proportions, 9 sets of mechanical tests were conducted. Using variable control method, design steel fiber volume ratios (%、0.5%、0.75%、1.0%、1.5%) and coconut shell fiber volume ratios (%、0.3%、0.5%、0.75%、1.0%), and prepare three parallel test blocks for each group; The compressive and splitting tensile strengths were measured using 150mm x 150mm x 150mm cube specimens, and the three-point bending strength was measured using 100mm x 100mm x 400mm specimens. The specimens were cured for 28 days according to the GB/T50081—2019 standard before testing. The results showed that the optimal dosage of steel fiber was 1.0%~1.5%. At this time, the compressive strength, splitting tensile strength, and flexural strength increased by 14.3%~16.3%, 14.2%~19.2%, and 31%~61.9% respectively compared to the benchmark group; The optimal dosage of coconut shell fiber is 0.3%, which increases the corresponding strength by 7.6%, 8.6%, and 14.3%, respectively. Beyond this volume dosage, the performance decreases; The effect of steel fiber in tensile and flexural reinforcement is 2.6 times and 4 times that of coconut shell fiber, respectively. Steel fiber is suitable for high-strength and high toughness components, while coconut shell fiber is suitable for low-cost and environmentally friendly scenarios. Both types of fibers have an optimal dosage threshold.

Keywords: concrete; steel fiber; coconut shell fiber; mechanical properties

引言

混凝土作为建筑工程用量最大的结构材料,虽具备抗压强度高、施工便捷等优势,但其抗拉强度低,仅为抗压强度的1/8~1/12,脆性指数高的固有缺陷,易导致结构在服役期因裂缝扩展引发耐久性失效。纤维增强^[1]技术因

能通过“裂纹桥接效应”抑制裂缝发展、改善材料韧性,已成为解决该问题的核心路径。研究表明:钢纤维可显著提升混凝土强度与韧性^[2-6]。不少学者对钢纤维长度、掺量及类型对混凝土力学性能的影响开展了大量研究,Abbas等^[7]认为钢纤维长径比对UHPC抗压强度影响不明

显, 相同掺量下长钢纤维 UHPC 的弯曲性能比短钢纤维的差。牛龙龙等^[8]和李悦等^[9]均认为钢纤维掺量对混凝土抗压强度影响不显著, 剥裂强度、弯曲韧性和抗冲击性有明显提高。陈从春等^[10]认为 UHPC 钢纤维体积掺量为 1.0%, 2.5% 时, 抗折强度增长最快; 掺量为 1.0%, 1.5% 时, 剥裂抗拉强度增长最快。Wu 等^[11]认为同等掺量下端勾型钢纤维较直型和波纹型, 在提升超高性能混凝土 (Ultra-High Performance Concrete, UHPC) 土抗压强度和抗弯强度方面效率显著。李新星等^[12]研究表明平直微丝型钢纤维能使活性粉末混凝土 (RPC) 抗拉强度提升 123.4%, 端勾型钢纤维可让高强钢纤维混凝土 (SFRC) 抗压强度提高 10.7%, 抗拉强度提高 59.1%, 抗弯强度提高 38.4%。彭佳琳等^[13]研究表明, 平直型钢纤维体积掺量增至 3.0% 时, 超高性能混凝土 (UHPC) 28d 抗压强度较基准组提升 88.25%, 且端钩型钢纤维对力学性能的增强效果优于平直型与波纹型; 但钢纤维成本高, 且生产过程碳排放较高, 限制了其在低成本工程中的应用。

椰壳纤维作为天然环保材料, 兼具来源广、可降解、低成本等优势, 为绿色建材发展提供新方向。许多学者在椰壳纤维改善混凝土力学性能方面也进行了大量研究, 王继升^[14]研究表明 0.5% 掺量时混凝土抗压强度提升 23%~36%, 3.0% 掺量时剥裂抗拉强度提高 16%~29%, 且对抗拉性能的增强效果优于抗压。徐伟杰等^[15]发现, 椰壳纤维体积掺量 1.5% 时, UHPC 抗弯强度及延性性能较基准组显著提升, 且其对 UHPC 抗弯性能的增强效果优于黄麻、亚麻等植物纤维。黄锋等^[16]认为混凝土内部孔洞数量和大小, 随着椰壳纤维掺量增加先减后增; 掺量 0.16% 时, 试块抗压强度为 37.82MPa, 比素混凝土提高 20.60%, 达到峰值。

然而, 现有研究多单一聚焦钢纤维或椰壳纤维的作用效果, 均未系统对比两类纤维对混凝土抗压、剥裂抗拉、抗折性能的影响规律差异, 也缺乏不同工程需求下的纤维选型与掺量优化依据, 难以直接指导实际应用。

基于此, 本研究设计钢纤维 (体积掺量 0%~1.5%) 与椰壳纤维 (体积掺量 0%~1.0%) 9 组对比试验, 以基准素混凝土为对照, 通过标准立方体抗压、剥裂抗拉试验

及 100mm×100mm×400mm 试块三点弯抗折试验, 探究对比分析两类纤维不同体积掺量对混凝土力学性能的影响规律, 明确其最优掺量。

1 试验方案设计

1.1 试验材料

试验中选用的材料: 水泥、河砂、碎石、钢纤维/椰壳纤维和减水剂等。其中水泥为胶凝材料, 选用宜宾本地水泥厂生产的 P.O42.5 级水泥, 3d/28d 抗压强度为 17.0MPa/42.5MPa; 河砂为细骨料, 采用中砂, 细度模数为 2.7; 碎石为粗骨料, 选用粒径为 5~20mm 连续级配碎石; 水采用自来水; 减水剂采用聚羧酸高性能减水剂, 四川东润百盛新材料有限公司生产, 减水率 27%。所用钢纤维长度为 35mm、直径为 0.75mm、长径比为 47 的端勾型纤维。外形特征如图 1 所示。



图 1 端勾型钢纤维

椰壳纤维选用产自海南文昌地区的椰壳纤维, 为去除椰壳纤维表层的杂质, 采用碱化处理。将椰壳纤维浸泡在 10% 的 NaOH 溶液中 24h, 之后捞出冲洗至中性, 在 60°C 烘箱中烘干 12h 后, 人工剪切成 2cm 长的短纤维。椰壳纤维处理流程如图 2 所示。

1.2 试验设计

本次共设计 9 组不同纤维掺量混凝土试验, 对比分析研究钢纤维和椰壳纤维不同体积掺量对混凝土力学性能影响规律。其中 C-0 组为无纤维添加对照组, 试件编号 F 表示椰壳纤维类型; S 表示钢纤维。每组设计 9 个试块, 其中 3 个抗压试块、3 个抗拉试块和 3 个抗弯试块, 共计 81 个试块。减水剂为水泥掺量的质量百分比, 混凝土配合比及试验参数设计见表 1。



图 2 椰壳纤维碱处理流程图

表 1 配合比设计

编号	水泥 kg/m ³	河砂 kg/m ³	碎石 kg/m ³	水 kg/m ³	减水剂	纤维掺量
C-0	360	760	1158	166	1.5%	0
CF1	360	760	1158	166	1.5%	0.30%
CF2	360	760	1158	166	1.5%	0.50%
CF3	360	760	1158	166	1.5%	0.75%
CF4	360	760	1158	166	1.5%	1.00%
CS1	360	760	1158	166	1.5%	0.50%
CS2	360	760	1158	166	1.5%	0.75%
CS3	360	760	1158	166	1.5%	1.00%
CS4	360	760	1158	166	1.5%	1.50%

1.3 试件制作及养护

试件制作采用先干拌制的方法,首先在 60L 强制式单卧轴搅拌机中,依次倒入碎石和 40% 河砂,启动搅拌机干搅 30s,使其混合;其次分两次均匀撒入称量好的纤维,每次搅拌 30s;然后,依次加入水泥和剩余 60% 河砂干拌 60s,充分均匀混合干拌料;最后加入水和减水剂搅拌 120s,拌合物出现流动黏稠状。将拌好的混凝土分别浇筑到 100mm×100mm×400mm 长方体试模和 150mm×150mm×150mm 立方体试模中,高频振动台上振动 1~2min,振动密实完成后,在室温覆膜放置 24h,拆模放入标准养护箱中养护 28d,开始试验。

1.4 测试方法

对表 1 中不同纤维掺量混凝土试块,按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T50081—2019)^[17]进行试验。试验时,按荷载控制进行均匀连续加载,抗压强度试验采用 200T 电液伺服压力试验机,加载速度为 0.5MPa/s,如图 3 所示。采用 100T 微机控制电液伺服万能试验机完成劈裂抗拉强度和抗折强度试验,加载速度为 0.05MPa/s。加载设备如图 4 和图 5 所示。



图 3 抗压强度试验



图 4 劈裂抗拉试验



图 5 三点弯试验

2 试验结果分析

2.1 不同纤维混凝土抗压强度影响分析

表 2 中系统记录了不同纤维掺量对应的混凝土立方体 28d 抗压强度数据;为进一步明晰纤维掺量对混凝土立方体抗压强度的作用趋势,将二者的影响关系绘制成曲线,见图 6。

表 2 不同纤维掺量混凝土立方体抗压强度

编号	纤维掺量 (%)	抗压强度 Mpa	标准差 Mpa	较基准组提升%
C-0	0	43.5	0.5	
CF1	0.30%	46.8	0.9	7.6%
CF2	0.50%	42.8	1	-1.6%
CF3	0.75%	42.9	1.1	-1.4%
CF4	1.00%	40.5	0.6	-6.9%
CS1	0.50%	48.3	0.8	11.0%
CS2	0.75%	49.4	0.7	13.6%
CS3	1.00%	49.7	0.7	14.3%
CS4	1.50%	50.6	0.6	16.3%

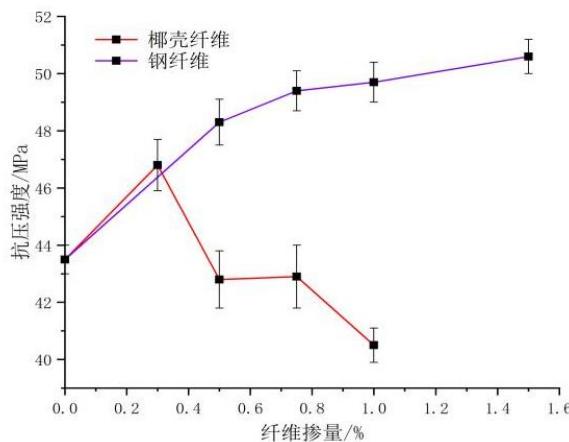


图 6 不同纤维掺量条件下混凝土立方体抗压强度试验曲线

对比表 2 中不同钢纤维掺量对应的混凝土立方体 28d 抗压强度数据,结合图 6 所示的影响趋势曲线可见,钢纤维对混凝土力学性能的增强效应显著,且该效应随钢纤维掺量的增加而逐步凸显,具体体现为混凝土立方体抗压强度随掺量提升而持续增长。当掺量为 1.5% 时,试件的抗压强度达到 50.6MPa,比未添加纤维的混凝土提高了 16.3%。钢纤维通过“桥接作用”有效抑制了混凝土内部微裂缝的扩展,减少了受压时的裂缝贯通,从而提升了强度。

椰壳纤维掺量增加过程中,混凝土抗压强度的变化并非单一趋势,其初始阶段随掺量提升而逐渐上升,随后稳步下降,其强度提升效果远不及钢纤维。在椰壳纤维掺量为 0%~0.3% 时,混凝土的抗压强度上升,并在 0.3% 掺量下达到最高值 46.8MPa,较未添加纤维的混凝土提升了 7.6%;超过 0.3% 后,抗压强度逐渐降低,1% 掺量时降至最低值 40.5MPa,对比未掺纤维混凝土,其抗压强度下降 6.9%。这说明合理的纤维掺量能对试件产生正向约束力,进而对提升抗压强度发挥积极效应,椰壳纤维在混凝土中的应用存在最优体积掺量为 0.3%。

相同掺量下,钢纤维对混凝土抗压性能的增强效果是椰壳纤维的 1.4~2.1 倍。不过,钢纤维的成本相对较高(当钢纤维混凝土增强效果达 2.1 倍时,钢纤维费用是椰壳纤维的 9 倍),且在施工过程中对工艺要求更为严格,需根据工程需求选择合适的纤维类型及掺量以实现最佳性能。

2.2 不同纤维混凝土劈裂抗拉强度影响分析

不同纤维掺量混凝土 28d 劈裂抗拉强度见表 3,不同纤维掺量对混凝土劈裂抗拉强度影响关系曲线如图 7 所示。

结合表 3 与图 7 所示分析可得:钢纤维掺量增加过程中,混凝土劈裂抗拉强度整体呈线性递增态势,但不同掺量区间的增长特征存在差异。具体而言,当钢纤维掺量≤

0.5% 时,混凝土劈裂抗拉强度增长速率较为缓慢,纤维对劈裂抗拉性能的增强效应尚未充分显现;而当掺量突破 0.5% 后,继续增加钢纤维掺量,混凝土劈裂抗拉强度的提升幅度明显加大,纤维的桥接阻裂作用得到更充分发挥,增强效果显著优于低掺量阶段。当钢纤维掺量达到 1.5% 时,劈裂抗拉强度可达最大 3.60MPa,较未添加纤维的混凝土提高了 19.2%,充分展示了钢纤维在增强混凝土抗拉性能方面的卓越效果。

表 3 不同纤维掺量混凝土劈裂抗拉强度

编号	纤维掺量 (%)	抗拉强度 Mpa	标准差 Mpa	较基准组提升%
C-0	0	3.02	0.03	
CF1	0.30%	3.28	0.09	8.6%
CF2	0.50%	3.20	0.10	6.0%
CF3	0.75%	3.18	0.08	5.3%
CF4	1.00%	2.86	0.08	-5.3%
CS1	0.50%	3.25	0.14	7.6%
CS2	0.75%	3.44	0.13	13.9%
CS3	1.00%	3.45	0.08	14.2%
CS4	1.50%	3.60	0.14	19.2%

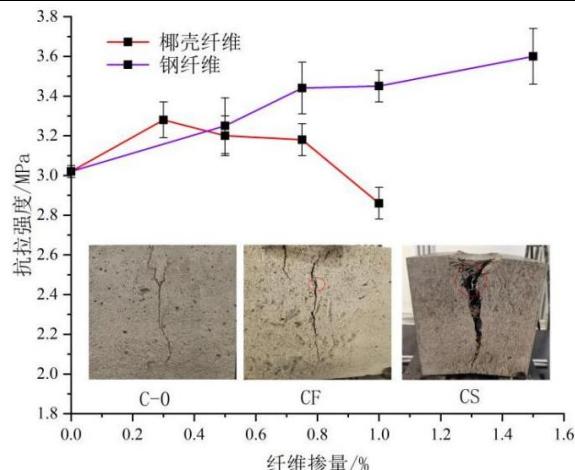


图 7 不同纤维掺量条件下混凝土的劈裂抗拉强度试验曲线

相比之下,椰壳纤维对混凝土劈裂抗拉强度的提升效果低于钢纤维。在椰壳纤维掺量为 0%~0.75% 时,混凝土的劈裂抗拉强度得以提升,但随着纤维掺量增加而增强效果降低,并在 0.3% 掺量下达到最大 3.28MPa,较未添加纤维的混凝土提升了 8.6%。然而,随着掺量继续增加至 1.0%,劈裂抗拉强度降至 2.86MPa,较未添加纤维的混凝土降低了 5.3%,这主要是由于椰壳纤维的弹性模量较低,且高掺量时易出现团聚现象,导致界面黏结失效,进而影响其抗拉强度。

相同掺量下,钢纤维对混凝土抗拉性能的增强效果高

达椰壳纤维的3.6倍。尽管椰壳纤维的提升幅度不及钢纤维,但在0.3%掺量时仍能显著改善混凝土的“抗拉脆性”,且具有成本低、环保等优点,适用于对抗拉要求中等且追求绿色建材的应用场景。虽然钢纤维增强效果明显,但成本较高(当钢纤维混凝土增强效果达3.6倍时,钢纤维费用是椰壳纤维的11倍),且对施工工艺要求更为严格。因此,在实际工程应用中,需根据具体需求选择合适的纤维类型及掺量,以实现混凝土抗拉力学性能和经济性的最佳平衡。

2.3 不同纤维混凝土抗折(抗弯)强度影响分析

不同纤维掺量混凝土28d抗折强度见表4,为直观呈现纤维掺量对混凝土抗折强度的影响规律,二者之间的关系以曲线形式呈现,具体如图8所示。

表4 不同纤维掺量的混凝土抗折强度

编号	纤维掺量 (%)	抗折强度 Mpa	标准差 Mpa	较基准组提升%
C-0	0	4.2	0.1	
CF1	0.30%	4.8	0.5	14.3%
CF2	0.50%	4.3	0.1	2.4%
CF3	0.75%	4.5	0.5	7.1%
CF4	1.00%	4.6	0.4	9.5%
CS1	0.50%	4.6	0.1	9.5%
CS2	0.75%	4.9	0.4	16.7%
CS3	1.00%	5.5	0.4	31.0%
CS4	1.50%	6.8	0.4	61.9%

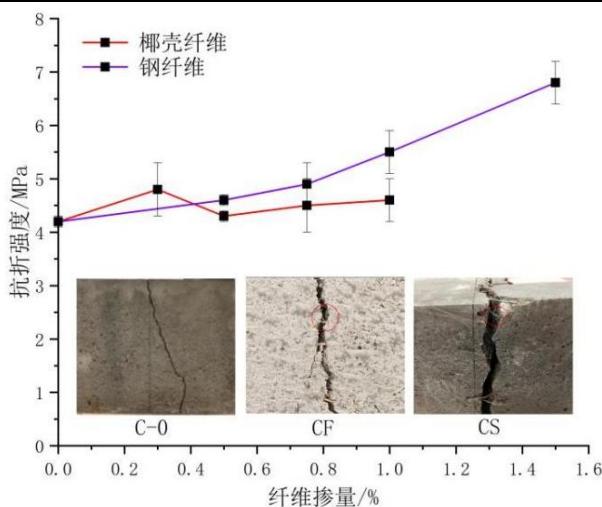


图8 不同纤维掺量条件下混凝土的抗折强度试验曲线

结合表4与图8分析可知,随着钢纤维掺量的增加,混凝土弯曲抗折强度整体呈线性递增态势。当钢纤维体积掺量分别为0.5%、0.75%、1.0%与1.5%时,混凝土抗折强度依次达到4.6MPa、4.9MPa、5.5MPa和6.8MPa;

相较于未掺钢纤维的素混凝土试件,强度提升幅度分别为9.5%、16.7%、31%与61.9%。与抗压、劈裂抗拉性能的增强特征相同,钢纤维对弯曲抗折强度的提升作用显著。

相比之下,椰壳纤维对混凝土抗折强度的提升效果低于钢纤维。随着椰壳纤维的掺入,混凝土抗折强度均有不同程度的提高,增长幅度呈现出先增大后减小的趋势。在掺量为0%~0.3%时,抗折强度呈线性增加,在0.3%掺量下抗折强度达到4.8MPa,相较于未添加纤维的混凝土提升了14.3%。当纤维掺量处于0.3%~1%时,抗折强度增强效果有所降低,试件破坏表现出一定的延性特征,破坏时主裂缝走向更为曲折,且周围伴有多条微裂缝。

综上所述,与抗拉性能一致,钢纤维的增强效果显著(最大提升61.9%),最优掺量为1.5%;椰壳纤维的提升效果有限(最大提升14.3%),最优掺量为0.3%。两种纤维均能改善混凝土的脆性,且钢纤维的韧性提升效果远优于椰壳纤维。受弯构件需同时满足“抗折强度”与“韧性”要求,可优先选用1.0%~1.5%钢纤维混凝土;若为临时设施或低成本构件,可选用0.3%椰壳纤维混凝土。

3 结语

本文通过9组力学试验,系统剖析钢纤维与椰壳纤维不同体积掺量对混凝土力学性能的影响机制。明确钢纤维对混凝土力学性能的增强存在显著最优体积掺量区间,掺量1.0%~1.5%时,增强效果显著;椰壳纤维最优体积掺量为0.3%,此时混凝土抗压、抗拉和抗折性能均得到明显改善;相同掺量下,钢纤维对混凝土力学性能的增强效应全面优于椰壳纤维,钢纤维显著提升混凝土抗压性能,劈裂抗拉强度提升效果是椰壳纤维的2.6倍,抗折强度改善效果是椰壳纤维的4倍。本研究为解决实际工程中纤维选型及掺量适配问题,提供试验支撑。

基金项目:2024年教学成果培育项目(202403020C);成都工业学院人才项目博士基金(2024RC010);工业学院实验室开放基金(2024LOF016);教学改革与质量提升工程项目(2025SJJX012);成都工业学院2025年第二批创新性实验项目“纤维性材料改性混凝土力学性能研究”

参考文献

- [1]唐都都.纤维对混凝土力学性能影响研究进展[J].福建建材,2024,11(7):123-126.
- [2]王若冰,刘洋洋.钢纤维混凝土材料的力学性能研究[J].江苏建材,2025,12(2):44-46.
- [3]白敏,牛荻涛,姜磊,等.钢纤维改善混凝土力学性能和微

- 观结构的研究[J].硅酸盐通报,2013,32(10):2084-2089.
- [4]常晨,罗云蓉,付磊.钢纤维混凝土力学性能研究综述[J].四川轻化工大学学报(自然科学版),2022,35(3):84-92.
- [5]梁兴文,胡翱翔,于婧,等.钢纤维对超高性能混凝土抗弯力学性能的影响[J].复合材料学报,2018,35(3):722-731.
- [6]李新星,周泉,李水生.钢纤维对活性粉末混凝土性能影响研究[J].施工技术,2020,49(14):81-85.
- [7] ABBAS S, SOLIMAN A M, NEHDI M L, et al. Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete in incorporating various steel fiber lengths and dosages[J]. Construction and Building Materials, 2015, 75(30):429-441.
- [8]牛龙龙,张士萍,韦有信.钢纤维掺量对混凝土力学性能的影响[J].混凝土与水泥制品,2019,11(3):51-54.
- [9]李悦,王兴雷,丁庆军.钢纤维长度与掺量对混凝土力学性能的影响[J].混凝土,2017,12(7):62-65.
- [10]陈从春,冯毅,陈晓冬.钢纤维体积掺量对超高性能混凝土力学性能的影响[J].新型建筑材料,2016,43(5):54-56.
- [11] WU Z, SHI C, KHAYAT K H. Investigation of mechanical properties and shrinkage of ultra-high performance concrete: Influence of steel fiber content and shape[J]. Composites, 2019, 174(1):107021.
- [12]李新星,周泉,李水生.钢纤维类型和掺量对高性能混凝土力学性能的影响[J].混凝土,2024(12):145-152.
- [13]彭佳琳,黄智德,姚帅,等.钢纤维的形状和掺量对超高性能混凝土性能的影响[J].混凝土与水泥制品,2025,11(7):48-53.
- [14]王继升.椰壳纤维增强混凝土力学性能[J].交通世界,2023(29):43-45.
- [15]徐伟杰,秦培成,单波,等.椰壳纤维超高性能混凝土基本力学性能研究[D].海南:海南大学学报(自然科学版),2025.
- [16]黄锋,肖丽丽,贺建莹.椰壳纤维掺量对混凝土抗压强度和热湿性能的影响[J].建筑结构,2025,55(7):97-104.
- [17]混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T50081-2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [18]章焱.超高性能混凝土性能及其应用研究综述[J].居舍,2025,11(2):38-40.
- 作者简介: 张敏 (1986.6—), 西南交通大学, 岩土工程, 成都工业学院, 专任教师, 副教授。