

钢纤维混凝土力学性能研究综述

常 晟^a, 罗云蓉^b, 付 磊^b

(四川轻化工大学 a. 土木工程学院, 四川 自贡 643000; b. 机械工程学院, 四川 宜宾 644000)

摘要:钢纤维混凝土(SFRC)作为一种纤维增强混凝土,具有比普通混凝土更为优异的抗弯拉、抗裂及更为良好的冲击韧性等特点,但由于钢纤维混凝土造价高,施工困难,其发展受到了阻碍。为了更有效地解决目前SFRC存在的一些问题,从而为深入开展SFRC力学性能研究及推广提供有效信息,本文对目前SFRC静力及疲劳性能的研究进行了总结归纳。首先,从钢纤维增强混凝土的机理入手,阐述了钢纤维对混凝土性能产生增强效果的具体理论依据;其次,从钢纤维掺量、纤维长度、形状及纤维在混凝土中的分布形式等方面,阐述了钢纤维对混凝土静力性能与疲劳性能的影响规律;最后,对当前研究的阶段性成果及不足进行了展望。

关键词:钢纤维;混凝土;力学性能;疲劳

中图分类号:TU528.572

文献识别号:A

引 言

混凝土是目前世界上应用最广泛、用量最多的建筑材料。但是混凝土材料的显著缺点在于抗拉强度低、抗裂性差、韧性差,在混凝土中加入钢纤维可以改善混凝土的脆性行为,从而提高其吸收能量的能力^[1-4]。钢纤维混凝土(SFRC)因其更高的强度与能量吸收能力以及更好的耐久性等特性,在高层建筑、大跨度桥梁和海上结构的建造中发挥着重要作用^[5-7]。

自1901年提出用钢纤维来增强混凝土以来,SFRC的研究与发展取得了长足的进步。1963年部分学者开展了关于钢纤维约束混凝土裂缝扩展的

机理研究,发现SFRC开裂强度是由能够有效抵抗拉伸应力的钢纤维平均间距所决定的。至此,学者们的研究进入了这种新型复合材料的实用开发阶段。此后的20多年,SFRC在发达国家和发展中国家开始受到重视,在英、美、日等国发展得尤其迅速。

国内SFRC的研究与应用始于20世纪70年代。自20世纪80年代以来,该领域的试验研究得到迅速发展,中国工程建设标准化协会先后制定了一系列的相关规范,有力地推动了我国SFRC技术的发展。由于钢纤维的增强、阻裂作用,SFRC具有优良的静力和动力性能,当用作混凝土混合物的结构构件时,允许全部或部分地替代常规钢筋,因此被广泛应用

收稿日期:2021-06-29

项目基金:四川省粉末冶金工程技术研究中心开放基金课题项目(SC-FMYJ2019-07);过程装备与控制工程四川省高校重点实验室项目(GK201808;GK201816)

作者简介:常 晟(1995-),男,硕士生,研究方向为新型材料及结构的力学行为,(E-mail)370607587@qq.com

通信作者:罗云蓉(1974-),女,副教授,博士,研究方向为新型材料及结构的力学行为,(E-mail)510862595@qq.com

于建筑、道路、桥梁、隧道、军事工程等领域。通过在公路路面、桥面铺装、机场跑道、工业地坪等方面的试验性应用研究,现已将其推广至建筑工程和市政工程等领域并取得了不少成果。

本文从钢纤维混凝土的增强机理入手,综述了几个钢纤维混凝土的影响因素及其对力学性能的影响,在此基础上分析了存在的问题,并对未来可行的研究方向进行了展望。

1 钢纤维对混凝土力学性能的增强机理

钢纤维对混凝土的增强作用可以通过复合材料理论^[8]或纤维间距理论^[9]来解释。复合材料理论是指将至少两种相异属性的材料通过一定比例的分配,结合各类工艺技术而形成的新型材料。这种新型材料看似为一个整体,但各个组成部分又有明显交界面,所形成的复合型材料不仅能保有单一材料的优点,还产生了原材料所不具备的新型特性。依据该理论,可以将纤维增强混凝土看作纤维强化体系,以混凝土为基体、纤维为增强体的复合材料。假定纤维连续均匀分布,纤维与混凝土均为各向同性材料,二者受力与变形一致、无相对滑移,则纤维混凝土应力可由式(1)计算^[8]:

$$\sigma_c = \sigma_m(1 - V_f) + \sigma_f V_f \quad (1)$$

式中: V_f 为纤维体积分数,%; σ_c 为纤维混凝土抗拉强度,MPa; σ_f 为纤维抗拉强度,MPa; σ_m 为基体混凝土抗拉强度,MPa。

实际上,由于混凝土浇筑成型的特点,纤维在混凝土内部的分布并非连续均匀,故混凝土抗拉强度必须考虑到钢纤维的方向性、钢纤维长度及界面粘结等因素。因此,钢纤维混凝土的抗拉强度 σ_s 可由式(2)计算^[8]:

$$\sigma_s = \sigma_m(1 - V_f) + \eta_0 \eta_l \tau \frac{l_f}{d_f} V_f \quad (2)$$

式中: d_f 为钢纤维直径,mm; l_f 为钢纤维长度,mm; η_0 为方向效应系数, η_l 为有效长度嵌入系数; σ_s 为钢纤维混凝土抗拉强度,MPa; τ 为钢纤维与混凝土基体粘结强度,MPa。

纤维间距理论也称为纤维阻裂理论,是建立在线弹性断裂力学基础之上的,以纤维间距作为参数的纤维增强理论。跨越裂缝的纤维能起到将荷载传递给周围混凝土的作用,而跨越裂缝的纤维越多,纤维所提供的抗力越大,对裂缝继续发展的限制作用也就越大。该理论解释了纤维间距和单位面积内的纤维数量对增强效果的影响。

2 钢纤维对混凝土力学性能的影响

2.1 钢纤维掺量对混凝土静力性能的影响

工程实际中,经济适用性通常是一个重要的参考因素。钢纤维相较于其他纤维价格更加昂贵,用一个相对合理的掺量来平衡性能与经济性就显得尤为重要。

牛龙龙等^[10]发现增加钢纤维掺量能提高混凝土的部分力学性能,如图1所示。图1中可见,钢纤维的掺入,使混凝土的抗压强度略有降低,波动幅度小于8%,而钢纤维掺量对混凝土劈裂抗拉强度和抗弯强度影响明显。随着钢纤维掺量增加,混凝土劈裂抗拉强度和抗弯强度逐渐增大。钢纤维掺量为0.5%~2.0%时,劈裂抗拉强度提高了10%~74%,抗弯强度提高了11%~119%。

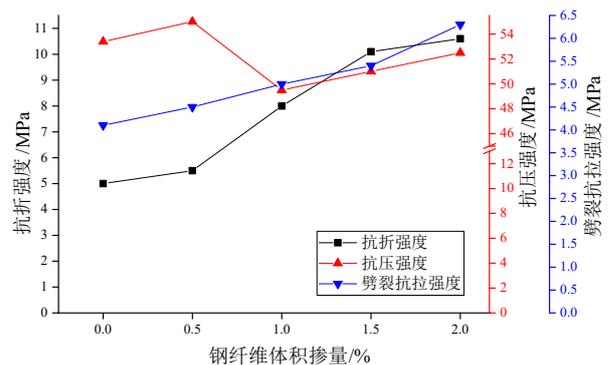


图1 钢纤维掺量对混凝土强度的影响

合理的钢纤维掺量可减少原始孔、缝的数量,使结构致密,并有效阻止混凝土微裂缝的产生和发展^[11]。Li等^[12]利用声发射(Acoustic Emission, AE)技术定位发声源,发现总发声源数随钢纤维体积分数的增加而增加,这是由钢纤维的滑移和拔出产生的;他们还发现随着纤维体积分数的增加,混凝土

试件的新生裂缝由拉裂缝向剪裂缝转变。岳健广等^[13]在三点弯切口梁实验中也得到了相似的结果,还发现SFRC的断裂能与钢纤维体积掺量呈近似线性的关系。文献[14]也发现断裂能随钢纤维体积掺量的增加而增加。Lee等^[15]试验结果表明,钢纤维增强抗剪能力的效果随纵向钢筋的数量而变化,这意味着相同体积分数的钢纤维在不同纵筋配筋下可能发生不同类型的破坏形式。

Bae等^[16]研究了钢纤维对高强混凝土柱结构性能的影响,发现钢纤维对结构强度、耗能等性能的影响明显优于横向钢筋;且钢纤维的增强效果在高横向钢筋配筋率时更好;此外,还基于ASCE41-13模型^[17],提出了一个新的预测钢纤维增强高强混凝土柱的抗剪强度贡献计算公式,如式(3)~(4)所示:

$$V_{c,suggestion} = (0.068f_{sp} + 0.56) \times \left(\frac{f_{sp}}{M/(Vd)} \sqrt{1 + \frac{N_u}{f_{sp}A_g}} \right) 0.8A_g \quad (3)$$

$$V_{n,suggestion} = V_{c,suggestion} + V_{s,Priestley} \quad (4)$$

式(3)~(4)中: A_g 为混凝土截面总面积, mm^2 ; d 为有效深度, mm ; $M/(Vd)$ 为设计荷载下弯矩与剪力和有效深度乘积的比值的最大值,该值应取在2~4范围内; N_u 为轴向力, kN ; $V_{c,suggestion}$ 为混凝土提供的抗剪强度, MPa ; $V_{n,suggestion}$ 为构件的抗剪强度, MPa ; $V_{s,Priestley}$ 为剪力钢筋贡献的抗剪强度, MPa ; f_{sp} 为纤维混凝土的劈裂强度, MPa 。

综上所述,合理的钢纤维掺量可以提高混凝土的致密程度,钢纤维本身通过参与受力,对混凝土抗弯拉性能有较为明显的提升。此外,在混凝土开裂后,钢纤维作为连接裂缝两侧混凝土的“桥梁”,使本应退出工作的混凝土区域继续承受应力,从而提高了整体结构的延性。值得注意的是,上述文献中,大部分纤维掺量不超过2%,这是为了使钢纤维的性能能够得到充分发挥的同时兼顾经济成本。

2.2 钢纤维长度对混凝土静力性能的影响

钢纤维作为一种金属材料,不同生产厂商的产品往往具有不同的形貌特征。纤维长度作为最直观可见的特征之一,其对混凝土材料的影响也较为

显著。

Han等^[18]研究表明:钢纤维长度对抗压强度和初始断裂韧性的影响不大,但劈裂抗拉强度、弯曲强度等均随长度增加而有所增加;大粒径粗骨料与长钢纤维组合的SFRC具有良好的力学性能。应文宗^[19]通过比较普通钢纤维(长度25 mm)与超短超细钢纤维(长度6 mm)发现,超短超细钢纤维在混凝土中的体积掺量能达到7.0%,并且超短超细钢纤维可以较大程度地提高其抗压强度,如图2所示。体积掺量上限提高的原因在于超短超细钢纤维尺寸及长径比均较小,相对普通钢纤维而言更易分散,故其在混凝土中的体积掺量能达到7.0%。而普通钢纤维尺寸较大,不易拌和均匀,影响了其性能的发

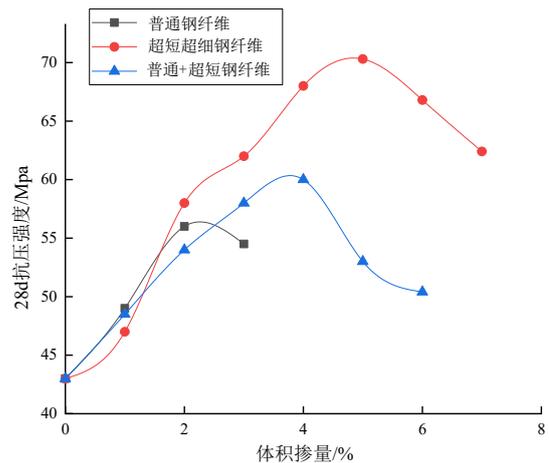


图2 不同钢纤维长度对抗压强度的影响

Ríos等^[20]研究结果表明,不同纤维长径比对最大抗拉强度的影响不大,而初裂强度受纤维长度的影响较大,当使用短纤维时,初裂强度值最高,这是由于穿过基体单位截面面积的纤维数量最多。

Abbas等^[21]发现,纤维长度对弯曲承载力和载荷-挠度行为有较大影响,相同的纤维用量下,含长纤维的梁在破坏荷载下的挠度则要高出含短纤维的梁约59%。但添加短钢纤维的梁具有更高的开裂与峰值载荷,两种荷载对应挠度也比长纤维梁分别高出27%和31%。这表明相同掺量下,短纤维更好地约束了微裂纹的产生,使微裂纹的发展速度降

低,从而使得短纤维梁表现出更明显的应变硬化行为^[22]。而长纤维则偏向于提高裂后性能,可以较大幅度地提高梁的延性。但纤维长度对断裂能的影响并不显著^[14]。此外,Abbass等^[23]发现不同强度等级的混凝土受纤维长度的影响也有所不同,长纤维对低等级混凝土的抗弯强度提升更为显著。

由此可见,钢纤维因其长度的不同,在混凝土结构中发挥的增强作用也有差异。短纤维主要强化的是开裂前性能,通过约束微裂纹起到提高初裂荷载的作用;而长纤维则更侧重于强化裂后性能,起到桥接作用,强化混凝土的延性。相对而言,单一纤维的研究已较为全面,而复掺不同长度的纤维,针对不同环境需求调整比例,发挥不同长度纤维的优势是未来一个不错的方向。

2.3 钢纤维形状对混凝土静力性能的影响

同样作为直观可见的特征之一,钢纤维的形状对混凝土也有着显著的影响。同钢筋类似,钢纤维形状的影响主要通过其与混凝土的粘结来实现。

王成启^[24]选择铣削型、弓型、圆直型3种类型的钢纤维进行了三点弯曲实验,结果表明:铣削型、弓型、圆直型SFRC抗弯强度分别比素混凝土提高19.0%、13.6%、9.5%。Shi等^[25]研究了端勾和平直型SFRC在单轴压缩和拉伸下圆柱型试件的本构关系,发现平直型SFRC比端勾型SFRC具有更高的抗拉强度,这可能是由于纤维-水泥基界面数量较多的缘故;而端勾型钢纤维混凝土在延性、残余强度和韧性方面则表现出更好的性能;为了考虑不同形状的影响,提出了一个修正的纤维增强指数 RI 计算公式:

$$RI = \xi \frac{l}{d_1} V_f \quad (5)$$

式中: V_f 为纤维体积分数,%; d_1 为纤维直径,mm; l 为纤维长度,mm; ξ 为形状因子。

此外,当掺量较高(大于1.5%)时,在端勾纤维混凝土混合物中更容易发生团聚现象。吕磊等^[26]利用SHPB试验系统对4种不同类型SFRC进行了动态力学性能测试,结果表明:4种钢纤维中,弓型钢

纤维对混凝土破坏形态的改善效果最好。

总之,异形钢纤维由于其与混凝土之间形成了更大的粘结力,使得钢纤维作为整体的一部分承担了应力,在混凝土开裂后保证周围的混凝土仍能持续工作,从而提高了混凝土的力学性能。但异形纤维的加入使得在搅拌阶段钢纤维的团聚状况加剧,因此在实际施工中钢纤维的选择需要更加慎重。

2.4 钢纤维分布形式对混凝土静力性能的影响

混凝土属于脆性材料,其主要特征是抗压强度高、抗拉强度低,而钢纤维的加入改善了混凝土抗拉强度低的特性。然而,混凝土的制作过程决定了钢纤维在混凝土中的分布形式往往具有较大的离散性,这导致相同条件下制备的SFRC试件仍会出现性能的差异。

Sarmiento等^[27]发现残余弯曲抗拉强度与断面中纤维数量之间的相关性随着裂缝宽度的增加而变差,这表明将截面上纤维的数量作为与残余弯曲强度关联起来的唯一参数是不准确的。Kang等^[28]发现较高的纤维取向系数使纤维的初裂应力略有增加,钢纤维取向对钢纤维桥接作用有较大的影响。Zhang等^[29]研究发现:钢纤维取向主要受壁面效应的影响;并且SFRC不能被描述为一种各向同性材料,由于新拌混凝土的流动性与壁面效应共同作用,纤维倾向于与梁的长边方向平行,而在圆柱形试样中,则倾向于向试件中心聚集。González等^[30]研究也印证了该观点,他们通过Computed Tomography (CT)扫描和Digital Image Processing (DIP)软件测量纤维取向,发现纤维倾向于平行水平面方向,对试样进行如图3~4(图3~4中长度单位均为mm)所示的加工处理,运用楔入劈拉试验(Wedge Splitting Test, WST)^[31-32]测量纤维混凝土的残余抗拉强度和断裂能,发现顶部立方体在拉力作用下表现出比边立方体更好的机械性能、硬化过程和比例极限。Yoo等^[33]对超高性能钢纤维混凝土梁进行了四点弯曲试验,发现当纤维取向较好(沿拉伸荷载方向的纤维数量较多)时,得到的初裂强度要高于取向较差的组别,挠度则更小。当达到峰值荷载时,纤维取向

影响显著,不同掺量下抗弯强度提升了约37%~111%。并且取向较好的试件破坏时的挠度均大于取向较差的组别,表现出更好的延性。

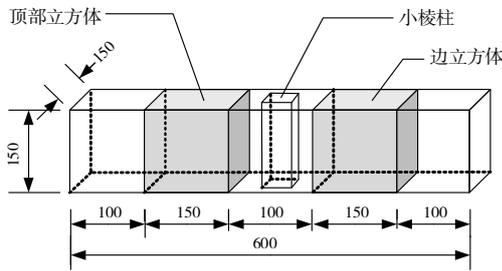


图3 立方体和棱柱体提取方案^[32]

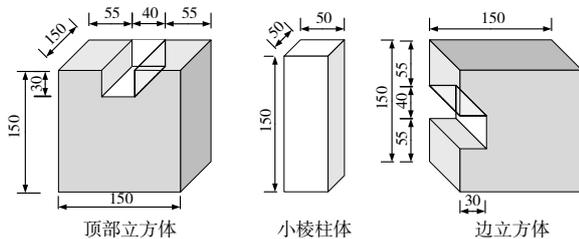


图4 立方体和棱柱体几何形状^[32]

Pal等^[34]发现立方体的棱角影响了钢纤维在该区域的分布取向,并且这种影响随着钢纤维体积分数的增加而增大,这使得圆柱型试件的抗压强度比立方体试件有更大的提高。Akçay等^[35]研究发现,不同形状的纤维会对纤维取向产生影响进而影响抗折强度等性能,在对不同类型纤维进行混合时应考虑这些因素。

慕儒等^[36-39]利用均匀电磁场控制钢纤维方向,成功制备定向钢纤维混凝土(ASFRC),还通过试验^[40-41]发现:相较于同条件下的SFRC,ASFRC的劈裂抗拉强度、抗折强度有更明显的提升,但抗压强度变化不大。并且,定向分布钢纤维混凝土断裂性能显著高于乱向分布钢纤维混凝土,不同掺量下断裂韧度提高了54%~82%,断裂能提高了82%~131%^[42]。因此纤维分布的均匀性也是混凝土力学性能的重要因素,均匀分布的纤维能提供最佳的强化效果。

综上,钢纤维的分布形式对混凝土有显著的影响,当钢纤维取向垂直于裂缝时,试件往往表现出更好的性能。目前,Pal等^[34]已经成功制备了定向钢纤维混凝土,但受限于专业设备及试件尺寸,在非实验室条件下制备实际尺寸的构件仍十分困难。

因此,如何通过相对简单的设备与工艺来制备纤维取向良好的钢纤维混凝土是一个不错的研究方向。

2.5 钢纤维对混凝土疲劳性能的影响

在我国许多地区,混凝土结构在使用期间可能会面临地震荷载、车辆荷载、干湿冻融作用等。这些构件受到循环荷载的作用,预计在其使用寿命期间能够承受因反复加载而产生的数百万次应力循环,容易发生疲劳失效。为了避免疲劳破坏的发生,必须考虑这些结构的疲劳性能。因而,混凝土结构的疲劳性能开始成为人们关注的焦点。

与普通混凝土相比,SFRC具有更好的疲劳性能和更高的疲劳寿命^[43-45]。SFRC疲劳是一个逐渐变化的过程,在应力循环过程中,微裂纹开始萌生和扩展,随着过程的进行,损伤开始累积,钢纤维被不断的拔出,随后形成宏观裂纹,构件中能够产生的抗力逐渐减小,混凝土承载力永久降低,最终导致破坏^[46]。虽然钢纤维会提高混凝土的疲劳性能,但这并不意味着增加钢纤维含量就一定会增加混合物的疲劳强度,相反过多的纤维会导致分布不均匀,降低疲劳性能^[47]。研究表明,当纤维分布更为分散时,往往表现出更佳的疲劳性能^[48-49]。通常,为了保证分布均匀,纤维体积分数以不超过1%为宜^[50]。

最近,对钢纤维混凝土结构梁的疲劳性能研究^[51]表明,钢纤维混凝土构件的拉伸疲劳行为受纤维承载力退化影响。对于普通混凝土梁,在进行疲劳评估时,受拉区混凝土的拉应力被忽略。而对于钢纤维混凝土梁,应考虑钢纤维在受拉区的桥接作用^[52]。加入钢纤维一方面减少了裂缝宽度^[48];另一方面,由于其桥接作用,减小了钢筋应力,从而提高了疲劳裂纹扩展的阻力^[43]。对于钢筋混凝土梁,受拉钢筋的应力范围是疲劳寿命的控制因素,所有梁在疲劳荷载作用下的破坏均由受拉钢筋的脆性断裂导致的。而钢纤维混凝土中由于钢纤维在混凝土受拉区域的桥接作用,相同外荷载下受拉钢筋承受的应力随着钢纤维含量的增加而减小,从而提高了混凝土的疲劳寿命^[51]。

SFRC是一种由离散的钢纤维增强的复合材

料,因此,SFRC的疲劳性能也受其离散性影响。试验^[53]发现,即使是相同的混合料和应力比下,疲劳寿命也有很大的分散性,这种离散性可达到1个或几个数量级。Vicente等^[54]利用电子计算机断层扫描(Computed Tomography, CT)技术研究了纤维取向和含量对SFRC在静态和循环压缩荷载作用下性能的影响,发现疲劳寿命的离散性与纤维取向和含量有关,纤维取向越差,离散性越大。而Makita等^[55]发现在SFRC中加入钢筋,就可以在提高抗拉强度的同时还能一定程度地降低由于纤维分布和取向引起的离散性。

Blasón等^[56]将循环蠕变曲线进行二次归一化后发现,该方法可以得到完整的 $\epsilon-N$ 曲线,这为将应变作为构件失去承载力或构件破坏的判断标准提供了依据。Carlesso等^[57]发现在较低的荷载水平下,SFRC也可能产生脆性破坏。这是由于较高的荷载水平下,SFRC的破坏通常是由于纤维被拔出造成的,而较小的荷载水平下,SFRC的破坏则是因微裂纹导致纤维-基体界面逐渐弱化所致。

由此可见,钢纤维的加入一方面可以提高混凝土的疲劳强度;另一方面加入钢纤维会导致整体实验数据的离散性增加。同时,不同荷载水平循环作用下,SFRC破坏时的裂纹宽度也有所不同。因此,探究如何降低因钢纤维引起的整体构件数据的离散性,以及不同荷载水平对纤维-基体界面的影响机理,成为不错的研究方向。

3 总结

近年来国内外学者对SFRC进行了大量的试验,研究了钢纤维掺量、长度、种类以及钢纤维分布

形式对混凝土力学性能的影响,但仍存在一些问题有待研究:

(1)随着钢纤维体积分数的增加,混凝土力学性能会得到一定程度的提升,当体积分数相同时,纤维取向(倾斜角)也会对力学性能产生影响,一般来说,纤维取向垂直于荷载作用方向时,性能提升最大。本文中试验大多使用的梁型和立方体混凝土试件,未来可以针对其他形式的构件进行研究。

(2)混凝土结构从浇筑到实际服役,与实验室不同,实际施工环境往往复杂多变,钢纤维由于运输与泵送等原因在混凝土内部的分布情况可能发生改变。同时,现场混凝土的施工往往是大面积进行的,大体积、大面积混凝土浇筑成型后要想对内部纤维分布进行检测往往比较困难。因此,如何保证拌合物内部钢纤维能够分布均匀,以及应用于现场成型后的混凝土中钢纤维分布的检测技术是两个明确的研究方向。

(3)在大部分情况下,钢纤维对混凝土抗压性能的提高并不明显,这表明受压区钢纤维的利用率较低。相较于普通混凝土而言,钢纤维混凝土在提高力学性能的同时造价也有所增加,为了兼顾力学性能与成本,选择合理的掺量以及合适的钢纤维类型是很有必要的。目前多数研究中,因素的选择较单一,多因素交互作用的影响尚不明确,应该加强这方面的研究。

(4)钢纤维的加入在提高混凝土疲劳强度的同时也增加了构件实验数据的离散性。因此,如何降低这种离散性,从而降低混凝土疲劳寿命的波动幅度、保证整体结构或构件的质量是一个不错的方向。

参考文献:

- [1] ZHENG X,JI T,EASA S M,et al.Tensile basic creep behavior of lightweight aggregate concrete reinforced with steel fiber[J].Construction and Building Materials,2019,200:356-367.
- [2] Al-KAMYANI Z,GUADAGNINI M,PILAKOUTAS K.Impact of shrinkage on crack width and deflections of reinforced concrete beams with and without steel fibres[J].Engineering Structures,2019,181:387-396.
- [3] KALPANA M,TAYU A.Light weight steel fibre reinforced concrete:a review[J].Materials Today:Proceedings,2020,22:884-886.

- [4] ZHANG J,REN H,HAN F,et al.Spall strength of steel-fiber-reinforced concrete under one-dimensional stress state[J].Mechanics of Materials, 2020,141:1-9.
- [5] HOU L,ZHOU B,GUO S,et al.Bond-slip behavior between pre-corroded rebar and steel fiber reinforced concrete[J].Construction and Building Materials,2018,182:637-645.
- [6] MCMAHON J A,BIRELY A C.Service performance of steel fiber reinforced concrete (SFRC) slabs[J].Engineering Structures,2018,168: 58-68.
- [7] JIN L,ZHANG R,TIAN Y,et al.Experimental investigation on static and dynamic mechanical properties of steel fiber reinforced ultra-high-strength concretes[J].Construction and Building Materials,2018,178:102-111.
- [8] 黄士元,蒋家奋,杨南如,等.近代混凝土技术[M].西安:陕西科学技术出版社,2002.
- [9] ROMUALDI J P,BASTON G B.Behavior of reinforced concrete beams with closely spaced Reinforcement[J].ACI Materials Journal,1963, 60(6):775-790.
- [10] 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(3):51-54.
- [11] 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.
- [12] LI B,XU L,SHI Y,et al.Effects of fiber type,volume fraction and aspect ratio on the flexural and acoustic emission behaviors of steel fiber reinforced concrete[J].Construction and Building Materials,2018,181:474-486.
- [13] 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.
- [14] 韩菊红,李明轩,杨孝青,等.混杂钢纤维二级配混凝土断裂性能试验研究[J].土木工程学报.2020,53(9):31-40.
- [15] LEE J,SHIN H,YOO D,et al.Structural response of steel-fiber-reinforced concrete beams under various loading rates[J].Engineering Structures, 2018,156:271-283.
- [16] BAE B,CHUNG J,CHOI H,et al.Experimental study on the cyclic behavior of steel fiber reinforced high strength concrete columns and evaluation of shear strength[J].Engineering Structures,2018,157:250-267.
- [17] Structural Engineering Institute.Seismic evaluation and retrofit of existing buildings:ASCE/SEI 41-13[S].Reston:American Society of Civil Engineering,2013.
- [18] HAN J,ZHAO M,CHEN J,et al.Effects of steel fiber length and coarse aggregate maximum size on mechanical properties of steel fiber reinforced concrete[J].Construction and Building Materials,2019,209:557-591.
- [19] 应文宗.不同类型钢纤维增强混凝土力学性能研究[J].交通标准化,2014,42(21):111-114.
- [20] RIO J D,LEIVA C,ARIZA M P,et al.Analysis of the tensile fracture properties of ultra-high-strength fiber-reinforced concrete with different types of steel fibers by X-ray tomography[J].Materials & Design,2019,165:1-14.
- [21] ABBAS S,SOLIMAN A M,NEHDI M L.Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages[J].Construction and Building Materials,2015,75:429-441.
- [22] MAGUREANU C,SOSA I,NEGRUTIU C,et al.Mechanical properties and durability of ultra-high performance concrete[J].ACI Materials Journal,2012,109:177-83.
- [23] ABBASS W,IQBALKHAN M,MOURAD S.Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete[J].Construction and Building Materials,2018,168:556-569.
- [24] 王成启.钢纤维类型对混凝土弯曲性能的影响[J].工业建筑,2007,37(11):74-76,114.
- [25] SHI X,PARK P,REW Y,et al.Constitutive behaviors of steel fiber reinforced concrete under uniaxial compression and tension[J].Construction and Building Materials,2020,233:1-15.
- [26] 吕磊,卫振海.钢纤维类型对混凝土动态力学性能影响试验研究[J].新型建筑材料,2018(4):47-51.
- [27] SAMIENTO E V,GEIKER M R,KANSTAD T.Influence of fibre distribution and orientation on the flexural behaviour of beams cast from flowable hybrid polymer-steel FRC[J].Construction and Building Materials,2016,109:166-176.
- [28] KANG S,KIM J.The relation between fiber orientation and tensile behavior in an ultra high performance fiber reinforced cementitious

- composites (UHPFRCC)[J].Cement and Concrete Research,2011,41:1001-1014.
- [29] ZHANG S L,ZHANG C S,LIAO L.Investigation on the relationship between the steel fibre distribution and the post-cracking behaviour of SFRC[J].Construction and Building Materials,2019,200:539-550.
- [30] GONZALEZ D C,MINGUEZ J,VICENTE M A,et al.Study of the effect of the fibers' orientation on the post-cracking behavior of steel fiber reinforced concrete from wedge-splitting tests and computed tomography scanning[J].Construction and Building Materials,2018,192:110-122.
- [31] LINSBAUER H N,TSCHEGG E K.Fracture energy determination of concrete with cube shaped specimens[J].Zement und Beton,1986,31:38-40.
- [32] BRUHWILER E,WITTMANN F H.The wedge splitting test,a new method of performing stable fracture mechanics tests[J].Engineering Fracture Mechanics,1990,35:117-125.
- [33] YOO D Y,YOON Y S.Structural performance of ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers[J].Engineering Structures,2015,102:409-423.
- [34] PAL S,SHARIQ M,ABBAS H,et al.Strength characteristics and microstructure of hooked-end steel fiber reinforced concrete containing fly ash,bottom ash and their combination[J].Construction and Building Materials,2020,247:1-14.
- [35] AKCAY B,OZSAR D S.Do polymer fibres affect the distribution of steel fibres in hybrid fibre reinforced concretes?[J].Construction and Building Materials,2019,228:116732.doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.116732.
- [36] 慕儒,赵全明,田稳苓.单向分布钢纤维增强水泥浆的制备与性能研究[J].河北工业大学学报,2012,41(2):101-104.
- [37] 慕儒,赵全明,田稳苓.制备单向分布钢纤维增强混凝土的方法及其专用设备:20100235371.X[P].2010-12-15.
- [38] 慕儒,李辉,王晓伟,等.单向分布钢纤维增强水泥基复合材料(II):制备及钢纤维增强作用[J].建筑材料学报,2015,18(3):387-392.
- [39] 慕儒,马艳奉,李辉,等.定向钢纤维混凝土中的钢纤维分布X-ray CT分析[J].电子显微学报,2015,34(6):487-491.
- [40] 慕儒,邱欣,赵全明,等.单向分布钢纤维增强水泥基复合材料(I):钢纤维方向控制[J].建筑材料学报,2015,18(2):208-213.
- [41] 慕儒,林建军,赵全明,等.单向分布钢纤维混凝土的力学性能研究[J].混凝土与水泥制品,2014(4):55-57.
- [42] 慕儒,王成,李辉,等.单向分布钢纤维增强水泥基复合材料(III):断裂性能[J].建筑材料学报,2016,19(1):78-82.
- [43] 赵燕茹,王志慧,谢业鹏,等.钢纤维钢筋混凝土梁弯曲性能与疲劳寿命试验研究[J].混凝土,2018(5):42-45,50.
- [44] 孙劲舟.钢纤维掺量对活性粉末混凝土疲劳强度的影响[J].山西建筑,2018,44(18):98-99,192.
- [45] 张明,景嘉骅.钢纤维高强混凝土梁疲劳寿命预测方法[J].建筑科学,2019,35(9):72-76,105.
- [46] 王波,金廷俊,陶庆东,等.钢纤维混凝土周期荷载作用前后AE及损伤演化对比研究[J].四川建筑科学研究,2018,44(4):102-107.
- [47] POVEDA E,RUIZ G,CIFUENTES H,et al.Influence of the fiber content on the compressive low-cycle fatigue behavior of self-compacting SFRC[J].International Journal of Fatigue,2017,101:9-17.
- [48] YANG J M,SHIN H O,YOON Y S,et al.Benefits of blast furnace slag and steel fibers on the static and fatigue performance of prestressed concrete sleepers[J].Engineering Structures,2017,134:317-333.
- [49] HACÈNE H,GHOFRANE B,GÉRARD D.Flexural fatigue performance of metal steel fibre reinforced mortar-Influence of fibre aspect ratio and type[J].Construction and Building Materials,2014,58:166-170.
- [50] GAO D,GU Z,ZHU H,et al.Fatigue behavior assessment for steel fiber reinforced concrete beams through experiment and fatigue prediction model[J].Structures,2020,27:1105-1117.
- [51] ADEL M,JIRADILOK P,MATSUMOTO K,et al.Evaluation of crack-bridging strength degradation in SFRC structural beams under flexural fatigue[J].Composite Structures,2020,244:112267.doi:10.1016/j.compstruct.2020.112267.
- [52] GAO D,GU Z,TANG J,et al.Fatigue performance and stress range modeling of SFRC beams with high-strength steel bars[J].Engineering Structures,2020,216:110706.doi:10.1016/j.engstruct.2020.110706.
- [53] ALSAIF A,GARCIA R,FIGUEIREDO F P,et al.Fatigue performance of flexible steel fibre reinforced rubberised concrete pavements[J].Engineering Structures,2019,193:170-183.

- [54] VICENTE M A,RUIZ G,GONZÁLEZ D C,et al.Effects of fiber orientation and content on the static and fatigue behavior of SFRC by using CT-Scan technology[J].International Journal of Fatigue,2019,128:105178.doi:10.1016/j.ijfatigue.2019.06.038.
- [55] MAKITA T,BRÜHWILER E.Tensile fatigue behaviour of ultra-high performance fibre reinforced concrete combined with steel rebars (R-UHPFRC)[J].International Journal of Fatigue,2014,59:145-152.
- [56] BLASÓN S,POVEDA E,RUIZ G,et al.Twofold normalization of the cyclic creep curve of plain and steel-fiber reinforced concrete and its application to predict fatigue failure[J].International Journal of Fatigue,2019,120:215-227.
- [57] CARLESS D M,ALBERT D,CAVALARO S P.Fatigue of cracked high performance fiber reinforced concrete subjected to bending[J].Construction and Building Materials,2019,220:444-455.

引用格式:

中文:常晟,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.

英文:CHANG S,LUO Y R,FU L.Summary of research on mechanical properties of steel fiber reinforce concrete[J].Journal of Sichuan University of Science & Engineering(Natural Science Edition),2022,35(3):84-92.

Summary of Research on Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforce Concrete

CHANG Sheng^a, LUO Yunrong^b, FU Lei^b

(a. School of Civil Engineering, Sichuan University of Science & Engineering , Zigong 643000, China:

b. School of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science & Engineering , Yibin 644000, China)

Abstract: steel fiber reinforced concrete (SFRC), as a kind of fiber reinforced concrete, has the characteristics of better flexural tensile resistance, crack resistance and better impact toughness compared with ordinary concrete. However, due to the high cost of SFRC and the difficulty of construction, it is unpopular in practical engineering. In order to solve the existing problems of SFRC more effectively, and provide effective information for further research of mechanical properties and promotion of SFRC, the current research on SFRC static and fatigue properties is summarized in the paper. Firstly, from the mechanism of steel fiber reinforced concrete, the specific theoretical basis of the reinforcing effect of steel fiber on concrete performance is elaborated. Secondly, from the aspects of steel fiber content, fiber length, shape and fiber distribution in concrete, the influence of steel fiber on the static and fatigue properties of concrete is expounded. Finally, the staged achievements and shortcomings of the current research are prospected.

Key words: steel fiber; concrete; mechanical property; fatigue