

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.05.015

周俊敏, 吴禹, 薛瑞. 高掺量钢纤维自密实混凝土梁抗弯性能分析[J]. 水利水运工程学报, 2015(5): 109-115. (ZHOU Jun-min, WU Yu, XUE Rui. Flexural behavior analysis of self-compacting concrete beam reinforced with high content of steel fiber[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(5): 109-115.)

高掺量钢纤维自密实混凝土梁抗弯性能分析

周俊敏¹, 吴禹¹, 薛瑞²

(1. 重庆市计量质量检测研究院, 重庆 401123; 2. 重庆交通大学 土木建筑学院, 重庆 400074)

摘要: 通过不断试配, 获得体积掺量为 3.0% 的高掺量钢纤维自密实混凝土的配置方法, 并在混凝土力学性能测试中得到相应配合比下混凝土的力学性能指标。利用 ANSYS 有限元软件, 对所设计的试验梁以实测材料参数为依据进行数值模拟。计算结果表明, 体积掺量为 3.0% 的钢纤维钢筋自密实混凝土梁与普通钢筋自密实混凝土梁相比, 其开裂荷载、屈服荷载、弯曲韧性及结构刚度得到明显提升。通过对 3.0% 的高掺钢纤维自密实钢筋混凝土梁与普通钢筋自密实混凝土梁在裂缝宽度随荷载的变化规律及同一截面不同高度处混凝土应变的分布情况的对比分析, 发现钢纤维具有良好的阻裂作用, 并能有效提高混凝土的极限拉应变。

关键词: 高掺量; 钢纤维自密实混凝土梁; 抗弯性能; ANSYS; 黏结滑移

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2015)05-0109-07

掺钢纤维自密实混凝土是自密实混凝土和钢纤维两种材料组合而成的一种性能优良的新型复合材料, 不仅能最大限度地发挥出各种材料的独自特性, 并且能赋予单一材料所不具备的优良特性。在自密实混凝土中掺加乱向分布的钢纤维, 不仅保留了新拌自密实混凝土优异的工作性能, 又大大提高了混凝土抗折、抗弯、抗拉、抗冲击和抗裂的能力, 能更好地满足新型建筑材料的要求。到目前为止, 国内外对掺纤维的自密实混凝土研究还远未满足工程应用的需要。为了促进我国掺纤维自密实混凝土技术的发展, 如今国内已有多名研究学者对相关领域展开了一系列的试验研究。例如丁一宁等^[1-2]在钢纤维自密实混凝土的工作性能、弯曲韧性和剪切韧性、弯剪性能方面所做的努力^[1-2]; 郑建岚等^[3-5]对自密实高性能混凝土结构的设计应用及纤维混凝土扁梁框架结构的抗震性能进行了研究^[3-5]。目前有关钢纤维自密实混凝土的研究中, 钢纤维体积率大多集中在 0.5% 左右, 针对高掺量钢纤维自密实混凝土的制备研究还较少。由于混凝土的自密实性能要求较好的流动性、抗离析性和填充性, 而掺入过多的钢纤维将会导致混凝土自密实性能难以满足。因此, 将高掺量钢纤维与自密实混凝土融合在一起, 配制高掺量钢纤维自密实混凝土的技术难度较大。本文成功制备出体积掺量为 3.0% 的钢纤维自密实混凝土, 并以实测材料参数作为依据, 重点针对高掺量钢纤维自密实混凝土配筋梁的抗弯性能进行数值模拟分析, 最终得出高掺量钢纤维自密实混凝土配筋梁较普通钢筋自密实混凝土梁, 屈服荷载、开裂荷载、结构刚度及弯曲韧性均有提高, 结果对同类研究具有参考意义。

1 试验设计

1.1 试验原材料

试验采用 P.O 42.5 普通硅酸盐水泥, 密度为 3.1 g/cm³; 粉煤灰采用电厂 I 级粉煤灰, 比表面积为 4 600 cm²/g, 密度 2.3 g/cm³; 粗骨料为 5~20 mm 连续级配的石灰岩碎石, 含泥量 0.3%, 密度 2.7 g/cm³; 细

收稿日期: 2015-02-05

作者简介: 周俊敏(1960—), 男, 四川南江人, 高级工程师, 主要从事计量检测与土木工程研究。

E-mail: 983486787@qq.com

骨料为细度模数 2.85 的中砂,密度 2.6 g/cm³;外加剂采用固含量为 25%的聚羧酸高效减水剂;钢纤维选用辽宁某公司生产的普通钢纤维:长 6 mm,直径 0.2 mm,长径比 30,密度 7 800 kg/m³,弹性模量 250 GPa,抗拉强度 3 100 MPa。

1.2 高掺量钢纤维自密实混凝土配合比

钢纤维自密实混凝土的技术特点是掺入的钢纤维与混凝土的自密实性能要求相矛盾。由于钢纤维的加入对自密实混凝土工作性能的影响较大,所以在自密实混凝土中不可能像普通钢纤维混凝土那样大量的掺入钢纤维。根据目前的研究情况^[6-7],本文主要针对制备的 3.0% 高掺量钢纤维自密实混凝土配筋梁的受力性能进行研究。

由于本文制备的混凝土钢纤维掺量较高,为保证自密实混凝土有足够的黏聚性和间隙通过性,本文采用的粗骨料最大粒径为 16 mm,且针片状含量不超过 8%,并采用 6 mm 短钢纤维。通过配合比试验研究发现,粗骨料在运动过程中会发生频繁接触,由于钢纤维的掺入,更容易出现阻塞堆积,只有低黏度砂浆通过粗骨料及钢纤维之间间隙的现象。考虑到这种情况,本文对基准配合比进行了适当调整,调整后的配合比拥有大量且较高黏度的砂浆和较少体积分量的粗骨料。这种配合比下的液相具备足够的携带能力,能使钢纤维及粗骨料悬浮于液相中,减少固体颗粒、钢纤维之间的碰撞接触。并且足够黏度的砂浆也避免了混凝土拌合物发生离析,特别是避免了只有浆体从骨料、纤维间的空隙中流走的情形发生。砂浆的黏度与砂浆中砂的体积分量和胶凝材料浆体的浓度有关。而胶凝材料浆体的浓度与水胶比有关,但是,一般水胶比由混凝土的配制强度确定,故本文配制 C40 混凝土时,通过调整减水剂用量以改善混凝土拌合物和易性。本文 SF 配合比中所用的胶凝材料为 686 kg,远大于 PT 配合比中的 575 kg,同时,SF 配合比中减水剂用量为 5.49 kg,占胶凝材料用量的 0.8%,而 PT 配合比中减水剂用量为 5.63 kg,占胶凝材料用量的 1%。

经过计算、试配和调整,本文得到普通自密实混凝土基准配合比和 3.0% 体积掺量钢纤维自密实混凝土配合比(见表 1)。

表 1 钢纤维自密实混凝土配合比

Tab. 1 Mixing proportion of steel fiber self-compacting concrete								kg
编号	水胶比	水泥	粉煤灰	水	粗骨料	细骨料	减水剂	钢纤维体积掺量/%
PT	0.29	403	172	167	763	763	5.63	0
SF	0.29	480	206	200	713	713	5.49	3.0

1.3 力学性能指数

选用 C40 自密实混凝土作为试验复合梁的基体。通过对材料进行试验测试,获得各组配合比所对应的混凝土力学性能指标以及试验使用的 Φ12 受拉主筋力学性能指标(见表 2)。本文采用试验实测值作为有限元计算参数。

表 2 混凝土(28 d)和受拉钢筋的力学性能指标

Tab. 2 Mechanical properties index of concrete(28 d)and tensile reinforcement										
混凝土					钢筋					
类别	基体强度等级	立方体抗压强度/MPa	抗压弹模/GPa	抗拉强度/MPa	级别	直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/GPa	截面收缩率/%
PT	C40	42.1	39.9	3.3	Ⅱ	12	388.2	512	21	24.8
SF	C40	59.9	56.8	7.0						



图 1 钢纤维形貌
Fig. 1 Steel fiber

1.4 试验梁设计

为体现 3.0% 高掺量钢纤维自密实混凝土梁与普通钢筋自密实混凝土梁力学性能上的差异,本文设计了体积掺量 3.0% 的钢纤维自密实混凝土复合梁和普通钢筋自密实混凝土梁。本文有限元分析采用的受弯梁均按照试验可行尺寸设计,梁全长 2 000 mm,计算跨径 1 800 mm。梁的受拉主筋采用 $\phi 12$ 的钢筋,架立筋采用 $\phi 12$ 的钢筋,箍筋和斜筋为 $\phi 6$ 的光圆钢筋。试验梁的配筋率、箍筋间距等构造要求严格按照《混凝土结构设计规范(GB 50010—2010)》^[8] 设计。梁的具体尺寸如图 2。普通钢筋自密实混凝土梁(PT)和掺 3.0% 钢纤维自密实混凝土复合梁(SF)均采用简支梁三分点加载法,试件尺均为 15 cm×25 cm×200 cm。

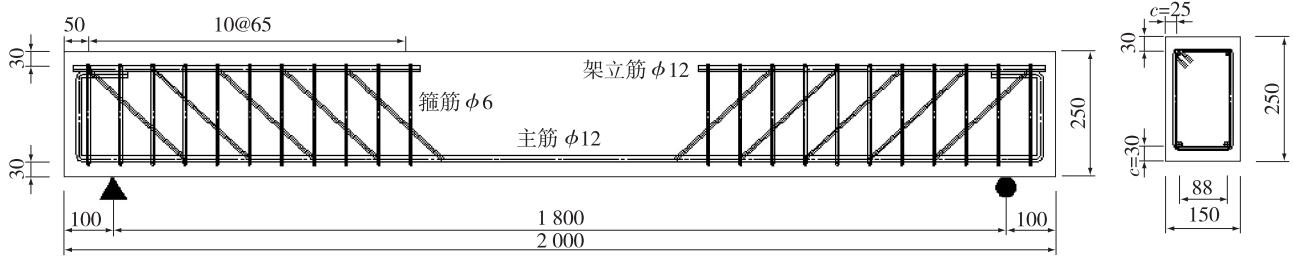


图 2 梁尺寸及配筋(单位:mm)

Fig. 2 Beam size and its reinforcement drawing (unit:mm)

2 有限元非线性分析

2.1 有限元模型的基本假设及建立

本文通过 ANSYS 有限元软件,按照试验梁的实际配筋情况及尺寸,建立了分离式模型^[9-10]。计算采用以下几点基本假设:①假定钢筋与混凝土在整个受力过程中,变形协调;②假定钢筋与混凝土间的黏结滑移关系满足 Houde 经验公式;③假定纤维在混凝土中均匀分布,纤维混凝土可以看作各项同性体,模型从混凝土力学性能指标的角度体现纤维对混凝土的影响。

分析模型需要关注钢筋混凝土的黏结滑移情况,并且要考虑支座垫块和其梁之间的接触情况,以此保证计算结果的真实度。其中普通自密实混凝土材料和钢纤维自密实混凝土材料采用 Solid65 单元,钢筋选用 link8 单元,支座处垫块采用 Solid45 单元,其中混凝土与钢筋的黏结滑移关系通过 Combin39 单元进行等效模拟,在钢筋混凝土梁与支座垫块的接触面上分别覆盖一层接触单元来模拟接触,接触单元使用 Conta174 单元,目标单元使用 Targe170 单元。在模型分析过程中,为了使计算收敛,关闭了 Solid65 单元的额外形状选项,并考虑该单元的开裂后应力松弛选项。在对 Solid65 单元设置混凝土破坏准则时,关闭了混凝土的压碎功能。普通自密实混凝土和纤维自密实混凝土本构采用多线性 MISO 模型,并且忽略混凝土应力应变曲线的下降段,钢筋本构采用双线性 BISO 模型。

为了使分析模型达到协调接触界面的目的,通过试算将接触单元中的罚刚度设置为 1.0。在钢筋与混凝土坐标一致的两节点位置,设置 3 根单元长度为零的正交一维弹簧单元 Combin39,通过设定弹簧单元的实常数,定义了该单元的广义位移-荷载曲线以模拟钢筋与混凝土间黏结滑移的非线性行为^[11]。其黏结滑移关系采用 Houde 经验式: $\tau = (5.3 \times 10^2 s - 2.52 \times 10^4 s^2 + 5.87 \times 10^5 s^3 - 5.47 \times 10^6 s^4) \sqrt{f_c / 40.7}$,其中: τ 为黏结应力(N/mm²); s 为滑移量(mm); f_c 为混凝土轴心抗压(MPa)。正由此换算得黏结力与滑移值的关系曲线,见图 3。

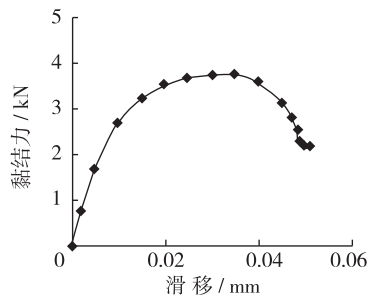


图 3 节点滑移-黏结曲线

Fig. 3 Curve of bond-slip relation

本文分析模型取 1/4 简支梁进行建模,目的在于提高其计算精准度,降低计算成本。任何一片试验梁的 1/4 模型都有 2 239 个节点,1 861 个单元。单元尺寸为 2.17 或 2.9 mm。根据简支梁的受力特性,分别在模型两个中面上施加垂直的法向位移约束。为防止应力集中,在荷载设计位置(梁跨 1/3 处)沿梁宽施加等效均布荷载。分析模型采用大位移静态分析,打开时间自动步长开关,并设置子步数为 1 000,设置子步数的最大平衡迭代次数为 100。一般情况下,ANSYS 默认的收敛准则不宜使计算收敛,可以适当放宽收敛条件以加速收敛,该分析模型使用位移收敛准则,收敛误差为 5%。

2.2 结果与分析

从 ANSYS 中绘出各组试验梁的荷载-位移关系曲线,如图 4 所示。可见,在开裂前,截面处于弹性工作状态;当梁体开裂后,曲线出现明显转折,不久,裂缝平稳发展,曲线斜率增大,形成拐点;而当受拉主筋屈服时,跨中挠度迅速增加,斜率再次迅速降低,出现拐点。该规律符合典型适筋梁的变形刚度理论,分析结果可靠准确。

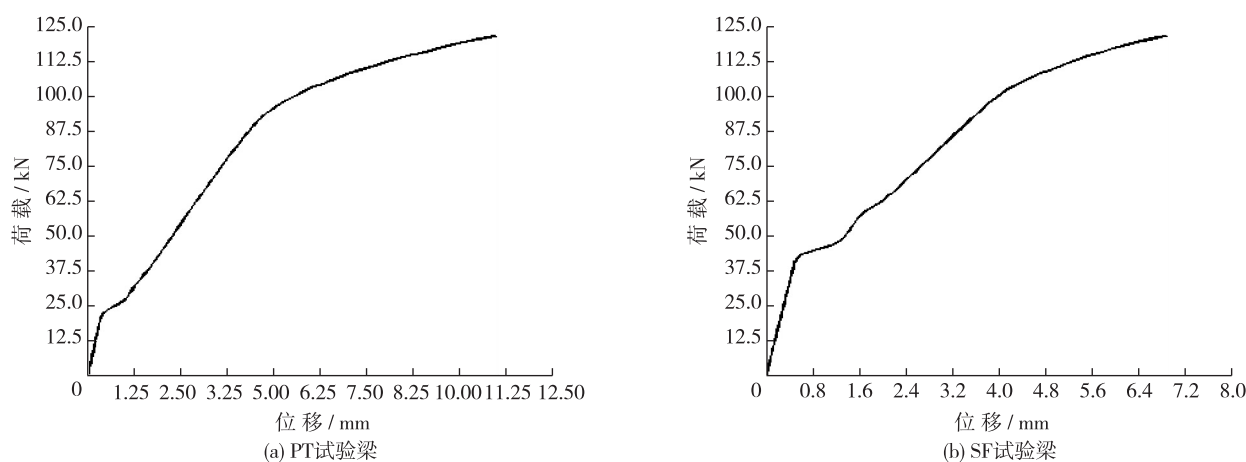


图 4 不同试验梁荷载-位移曲线的比较

Fig. 4 Comparisons between load-displacement curves of different test concrete beams

根据 ANSYS 计算结果可知,SF 试验梁的开裂荷载较普通梁提高了 105.9%,屈服荷载提高了 8.0%。由此可以看出,SF 试验梁其开裂荷载及屈服荷载较 PT 试验梁均有提高。并且 SF 试验梁与 PT 试验梁相比其刚度明显增大,例如 PT 试验梁在加载至 92.56 kN 时跨中挠度为 4.7 mm;SF 试验梁其值约为 3.8 mm。

另外,试验梁荷载-位移关系曲线所包围的面积可以反映出结构在荷载作用下吸收能量的能力。曲线越丰满,说明试验梁呈现出越大的韧性。考虑到本文有限元对弹性阶段及裂缝初始扩展阶段的计算较为准确,故弯曲韧性指标主要考察试验梁从开始加载至加载到跨中挠度为 4 mm 时荷载-位移曲线所包围的面积。经过计算,SF 试验梁的弯曲韧性较 PT 试验梁提高了 32.0%。可以发现,高掺量钢纤维对结构的增强增韧作用明显。

图 5 给出了 PT 试验梁和 SF 试验梁开裂前后在不同荷载步下沿跨中截面不同高度处的混凝土应变值,从图 5 可见:开裂前,2 组试验梁弯曲后横截面都保持为平面,符合平截面假定,2 组试验梁的中性轴大约都在 1/2 梁深处,全截面处于线弹性阶段。PT 试验梁和 SF 试验梁在开裂时受拉区边缘混凝土的极限拉应变分别约 84 和 166 $\mu\epsilon$,表明 30% 体积掺量钢纤维能有效提高混凝土的极限拉应变,与普通试验梁相比提高了 97.3%。梁开裂后,从混凝土平均应变的角度来看,仍可以假设开裂后截面符合平面变形条件,只是受拉区混凝土开裂后,裂缝不断开展和延伸,中性轴逐渐靠近受压区混凝土边缘。

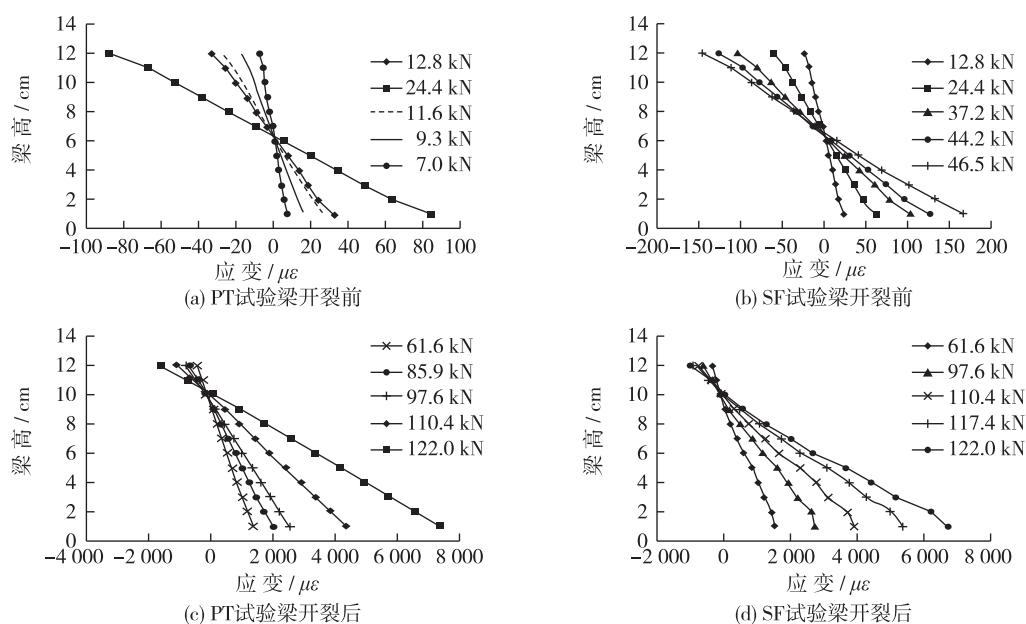


图5 试验梁开裂前后同一截面不同高度处的混凝土应变值

Fig. 5 Concrete strain values of same cross section at different heights before and after test beam cracking

从图6可知,荷载位于7~24.4 kN左右时,标距内测得的位移值随荷载呈线性变化,两组梁没有明显区别,随后PT试验梁先开裂,而SF试验梁开裂晚,由此进一步验证了钢纤维对裂缝开展的抑制作用。当梁开裂后,PT试验梁比SF试验梁的裂缝宽度发展快。在同一荷载作用下,PT试验梁的裂缝宽度小于SF试验梁。这表明在梁弯曲破坏过程中30%体积掺量钢纤维可以发挥出较好的阻裂效果,在相同荷载下,PT试验梁开裂截面中性轴更高。

3 问题讨论

本文通过ANSYS分析了高钢纤维掺量试验梁和未掺钢纤维试验梁在抗弯性能方面的差异,并且得到了相应的荷载-位移关系曲线、试验梁开裂前后同一截面不同高度处混凝土应变的分布情况和受拉区边缘处裂缝宽度随荷载的变化曲线。但在有些因素上本文考虑得还不够,在今后深入研究的过程中,值得进一步去完善。现就本文相关问题作如下探讨:

(1)实际试验过程中,受拉钢筋屈服后,中性轴快速上升,受压混凝土很快被压溃而致使试验梁最终失去承载力。为了计算收敛和避免结构在荷载较小阶段因为局部受压混凝土满足破坏准则而误判结构失去承载力退出计算,模型关闭了混凝土的压碎功能。鉴于此,本文将试验梁完全失去承载力之前的屈服荷载近似看作结构的极限荷载进行讨论。

(2)模型没有考虑钢纤维跨裂缝传递应力及钢纤维从基体中拔出的情况。在试验梁屈服时,其实仍有不少钢纤维在受拉区传递拉应力,所以,实际试验得到的屈服荷载还应大于有限元计算值。

(3)为了得到更真实、更贴近实际的计算结果,本文的有限元非线性分析模型考虑了钢筋与混凝土之间的黏结滑移,但由于本文试验并未研究钢纤维对钢筋与混凝土之间黏结滑移的影响,所以本文的分析模型采

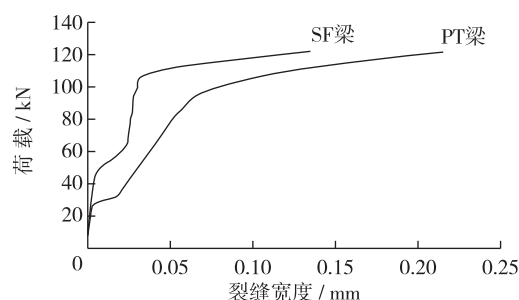


图6 受拉区边缘处裂缝宽度随荷载的变化曲线

Fig. 6 Change curves of tensile area edge crack width with loads

用了相同的黏结滑移关系。

(4) 本文有限元模型采用的是分布型裂缝,认为在开裂截面附近存在应力释放,附近点的应变为零。在单元开裂后,本文以划分的单元长度为标距,根据单元应变值计算得到裂缝宽度,而将裂缝宽度除以标距,就是本文得到的跨缝处混凝土平均应变。

4 结 语

通过 ANSYS 有限元数值分析,本文得出以下几点结论及推测:

(1) 钢纤维对梁开裂的抑制作用明显,钢纤维掺量为 3.0% 时,试验梁的开裂荷载、屈服荷载和弯曲韧性分别较普通梁提高了 105.9%、8.0% 和 32.0%。可以看出,3.0% 高掺量钢纤维能有效提高结构的刚度、开裂荷载及屈服荷载,并且对结构的增韧作用明显。

(2) 普通梁较掺 3.0% 体积钢纤维的试验梁其混凝土极限拉应变小,裂缝宽度发展更快,相同荷载作用下,中性轴更靠近受压区混凝土边缘,说明钢筋钢纤维自密实混凝土梁开裂更晚,裂缝发展较普通梁缓慢。从梁开裂后混凝土平均应变沿截面高度的分布情况来看,可假设开裂后截面仍符合平面变形条件。

(3) 采用有限元对弹性阶段及裂缝初始扩展阶段的计算较为准确,而后半段的计算结果较试验值偏小。

(4) 采用有限元法分析提供了试验性研究无法取代的模拟计算结果,与试验性研究相辅相成,可为同类研究提供参考。

参 考 文 献:

- [1] 丁一宁,刘思国. 钢纤维自密实混凝土弯曲韧性和剪切韧性试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(11): 55-63. (DING Yi-ning, LIU Si-guo. A study of the flexural and shear toughness of steel fiber reinforced self-compacting concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(11): 55-63. (in Chinese))
- [2] 刘赫凯. 钢纤维对高性能自密实混凝土构件弯/剪性能的影响[D]. 大连: 大连理工大学, 2011. (LIU He-kai. Influence of steel fiber on the flexural and shear behavior of high performance self-consolidating concrete elements [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011. (in Chinese))
- [3] 罗素蓉,郑建岚,王国杰,等. 自密实高性能混凝土结构的研究与应用[J]. 土木工程学报, 2005, 38(4): 46-52. (LUO Su-rong, ZHENG Jian-lan, WANG Guo-jie, et al. Research on and application of self-compacting high performance concrete structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(4): 46-52. (in Chinese))
- [4] 李铁慧. 纤维自密实混凝土配合比设计方法及其力学性能的研究[D]. 福建: 福州大学, 2006. (LI Yi-hui. A study of mix design and mechanical properties of fiber reinforced self-compacting concrete [D]. Fujian: Fuzhou University, 2006. (in Chinese))
- [5] 陈亚亮. 钢纤维预应力混凝土扁梁框架抗震性能研究[D]. 福州: 福州大学, 2005. (CHEN Ya-liang. Seismic behavior of fiber-reinforced prestressed wide-beam frames[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2005. (in Chinese))
- [6] 王冲,林鸿斌,杨长辉,等. 钢纤维自密实高强混凝土的制备技术[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(2): 130-134. (WANG Chong, LIN Hong-bin, YANG Chang-hui, et al. Preparation technology of fiber toughened self-compacting high-strength concrete[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2013, 35(2): 130-134. (in Chinese))
- [7] 余成行,刘敬宇,肖鑫. C60 钢纤维自密实混凝土的配合比设计和应用[J]. 混凝土, 2007(7): 74-78. (YU Cheng-xing, LIU Jing-yu, XIAO Xin. Mixture ratio design and application of C60 self-compacting concrete reinforced by steel fiber[J]. Concrete, 2007(7): 74-78. (in Chinese))
- [8] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. (GB 50010—2010 Code for design of concrete structures[S]. (in Chinese))
- [9] 江见鲸. 钢筋混凝土结构非线性有限元分析[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1994. (JIANG Jian-qiong. Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete structure[M]. Xi'an: Shanxi Science & Technology Press, 1994. (in Chinese))
- [10] 徐礼华,池寅,李荣渝,等. 钢纤维混凝土深梁非线性有限元分析在 ANSYS 中的实现[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2578-2582. (XU Li-hua, CHI Yin, LI Rong-yu, et al. Realization of ANSYS for nonlinear finite element analysis of steel fiber reinforced concrete deep beams[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(9): 2578-2582. (in Chinese))

- [11] 刘佩玺,徐永清,刘福胜. 钢筋混凝土结构粘结滑移分析在 ANSYS 中的实现[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2007,38(1): 125-130. (LIU Pei-xi, XU Yong-qing, LIU Fu-sheng. Realization of RC structure bond-slip analysis with ANSYS [J]. Journal of Shandong Agricultural University(Natural Science), 2007,38(1): 125-130. (in Chinese))

Flexural behavior analysis of self-compacting concrete beam reinforced with high content of steel fiber

ZHOU Jun-min¹, WU Yu¹, XUE Rui²

(1. *Chongqing Academy of Metrology and Quality Inspection, Chongqing 401123, China*; 2. *School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China*)

Abstract: A configuration method of 3.0% volume quantities of steel fiber reinforced self-compacting concrete has been got through continuous trial mixture in this study. Based on the concrete mechanics performance tests, the mechanical properties of concrete index under various mixing ratios are obtained. According to the measured material properties, the testing beams are simulated using ANSYS finite element software. The calculation results show that the cracking load, yielding load, flexural toughness and structure stiffness of 3.0% volume quantities of the steel fiber reinforced self-compacting concrete beam, compared with ordinary reinforced self-compacting concrete beams, are significantly increased. It is found that the anti-crack function of the steel fiber is obvious by comparative analysis of two groups of testing beams in the change law of the crack width changing with the load and the same cross section at different heights of concrete strain distribution. It can also effectively improve the ultimate tensile strain of concrete. The analysis results can provide a reference for the similar research projects.

Key words: high content; steel fiber reinforced self-compacting concrete beams; flexural behavior; ANSYS; bond slip