

文章编号:1671-6833(2009)04-0001-05

钢筋钢纤维混凝土牛腿抗裂性能有限元分析

张军伟, 高丹盈, 朱海堂

(郑州大学 新型建材与结构研究中心, 河南 郑州 450002)

摘 要: 在 17 个钢筋钢纤维混凝土牛腿试件试验的基础上, 采用非线性有限元方法探讨钢纤维体积率、剪跨比和混凝土强度对钢筋钢纤维混凝土牛腿抗裂性能的影响。结果表明, 掺入钢纤维后, 钢筋混凝土牛腿的正截面抗裂荷载可提高 10% 左右; 随着混凝土强度增加, 钢筋钢纤维混凝土牛腿的正截面抗裂荷载线性提高; 但是, 随着剪跨比增加, 钢筋钢纤维混凝土牛腿的正截面抗裂荷载明显降低。并且通过数值模拟分析结果和试验结果的对比, 验证了有限元分析模型中所采用的单元类型、材料本构关系及破坏准则的合理性, 为实际应用提供相应的参考。

关键词: 钢纤维混凝土; 牛腿; 抗裂性能; 有限元分析

中图分类号: TU 375

文献标识码: A

0 引言

在钢筋混凝土牛腿构件中掺入钢纤维不但可以明显改善牛腿钢筋的拥挤状况, 降低施工难度, 而且还能够显著增强钢筋混凝土牛腿的抗裂和阻裂性能。牛腿在荷载的作用下, 首先会在牛腿与柱交接处出现垂直裂缝, 因此有必要对钢筋钢纤维混凝土牛腿的正截面抗裂性能进行研究。鉴于国内外对钢筋钢纤维混凝土牛腿抗裂性能的研究侧重于试验, 鲜见有限元数值模拟分析相关的内容, 故笔者在钢筋钢纤维混凝土牛腿试验研究的基础上, 利用非线性有限元方法探讨钢纤维体积率、剪跨比和混凝土强度等对钢筋钢纤维混凝土牛腿正截面抗裂性能的影响, 以便为实际应用提供参考。

1 试验概况

根据试验研究目的, 参照文献[1~6], 以钢纤维体积率、混凝土强度、剪跨比等作为主要试验参数, 相应地设计了 FP、SCP 和 SK 3 个试验系列共计 17 个钢筋钢纤维混凝土牛腿试件。截面尺寸为: 宽度是 200 mm, 牛腿悬臂部分外侧高度是 150 mm、内侧高度是 300 mm。FP 和 SK 系列的长度为 800 mm, SCP 系列的长度为 500 mm。牛腿试件尺寸和配筋的具体情况如图 1 所示。FP 系列和

SCP 系列试件的纵向钢筋配筋率分别为 0.51% 和 1.01%, 不配箍筋, 钢纤维体积率 ρ_f 分别取为 0, 0.5%, 1.0%, 1.5% 和 2.0%。同时, SCP 系列混凝土强度等级分别取为 C30、C40、C50。SK 系列剪跨比分别取为 0.18, 0.36, 0.54, 0.71 和 0.79, 钢纤维体积率取为 1.0%。每种试件还预留有 6 个 150 mm × 150 mm × 150 mm 的立方体试块, 以便在试验过程中及时测试每个混凝土试件的抗压强度 f_{cu} 。另外, 为了防止在试验过程中柱子先于牛腿破坏的情况, 根据计算在柱子中配置了超量的受压钢筋和箍筋。

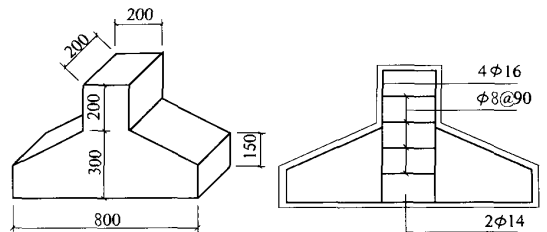


图 1 牛腿受弯试件尺寸及配筋 (FP 和 SK 系列)

Fig. 1 The sizes and reinforcements of specimen (FP and SK)

试验采用 AMI04-32-600 钢纤维, 长径比为 40, 抗拉强度 ≥ 700 MPa。水泥为 P. P42.5 火山灰质硅酸盐高强度水泥, 骨料最大粒径为 20 mm, 级

收稿日期: 2009-04-16; 修订日期: 2009-07-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50678159)

作者简介: 张军伟 (1980-), 男, 河南驻马店人, 郑州大学博士研究生, 主要从事纤维复合材料增强混凝土及其结构性能研究, E-mail: Zhang-junwei2007@yahoo.com.cn.

配良好。

试验在 2 000 kN 压力试验机上进行,采用直接对柱施加集中荷载的反向加载方法. 试验中,主要测试牛腿的纵向钢筋应变、牛腿悬臂部分与柱

子交接面处混凝土应变、各级荷载下最大裂缝宽度及出现位置、正截面开裂荷载和极限荷载等. 正截面开裂荷载的试验结果见表 1.

表 1 牛腿正截面开裂荷载试验结果

Tab.1 The results of tests of specimen under the cracking loading of experiments

试件编号	实际宽度 /mm	实际高度 /mm	混凝土强度 f_{cu}/MPa	剪跨比 (a/h_0)	正截面开裂荷载 F/kN		试验值/ 计算值	破坏形式
					试验值	计算值		
FP-0	201	315	37.6	0.75	55.0	57.09	0.96	弯曲
FP-0.5	205	315	35.3	0.75	55.0	54.59	1.01	弯曲
FP-1.0	202	317	43.6	0.75	55.0	62.59	0.88	弯曲
FP-1.5	198	307	43.6	0.75	70.0	63.91	1.1	弯曲
FP-2.0	201	314	45.4	0.75	70.0	64.09	1.09	弯曲
SCP-40-0	202	309	37.6	0.25	100.0	127.97	0.78	剪切
SCP-40-0.5	201	304	35.3	0.25	110.0	124.22	0.89	剪切
SCP-40-1.0	205	311	45.9	0.25	137.5	143.77	0.99	剪切
SCP-40-1.5	201	304	43.6	0.25	130.0	139.86	0.93	剪切
SCP-40-2.0	202	300	45.4	0.25	165.0	142.27	1.16	剪切
SCP-30-1.0	200	301	39.2	0.25	142.5	131.72	1.04	剪切
SCP-50-1.0	201	312	53.5	0.25	137.5	155.56	0.88	剪切
SK-0.18	200	317	45.3	0.18	125.0	155.36	0.80	剪切
SK-0.36	198	314	47.8	0.36	110.0	134.77	0.82	剪切
SK-0.54	201	318	47.8	0.54	110.0	105.47	1.04	剪切
SK-0.71	201	312	34.8	0.71	90.0	81.13	1.11	剪切
SK-0.79	200	317	37.1	0.79	62.5	64.09	0.98	剪切

注:试件编号中,F表示弯曲破坏;S表示剪切破坏;C表示混凝土强度;P表示钢纤维体积率;K表示剪跨比.

2 非线性有限元分析模型

2.1 材料的本构关系模型

混凝土的单轴受压应力-应变曲线方程采用文献[3]建议的表达式,其中混凝土轴心抗压强度 f_c .按照条文说明中的公式,由试验所测得的立方体抗压强度推算.

混凝土的单轴受拉应力-应变曲线假定混凝土从开始直至拉裂均为直线,即应力达到混凝土最大抗拉强度时,混凝土开裂,开裂前混凝土的弹性模量与受压时的初始弹性模量相同.开裂后的混凝土按非脆性材料考虑,即裂缝面上的混凝土抗拉强度并不立即下降到零,而是随着裂缝的加宽而逐渐下降.混凝土的单轴抗拉强度 f_t 按照文献[3]中的有关规定,由试验所得的立方体抗压强度推算确定.

钢筋和钢纤维均采用双折线的理想弹塑性应力-应变关系,不考虑屈服硬化,屈服准则采用Mises 准则.钢筋和钢纤维的几何、物理性质基本
万方数据

取与试验试件一致,只是由于钢纤维混凝土的破坏主要是因为钢纤维拔出,故取钢纤维拔出时的拉应力作为钢纤维的抗拉强度.

2.2 混凝土破坏准则和裂缝处理

2.2.1 混凝土破坏准则

混凝土在多轴受力状态下的破坏准则采用Willam-Warnke 五参数模型,其表达式为:

$$p/f_c - S \geq 0 \tag{3}$$

式中: p 为主应力 $\sigma_1、\sigma_2、\sigma_3$ 的函数; S 为主应力 $\sigma_1、\sigma_2、\sigma_3$ 与 $f_t、f_c、f_{cb}、f_1、f_2$ 5 个参数定义的破坏面; $f_t、f_c、f_{cb}、f_1$ 和 f_2 分别为混凝土的单轴抗拉强度、轴心抗压强度、等压双轴抗压强度、围压力下双轴抗压强度、围压力下多轴抗压强度.采用 AN-SYS 程序的处理方法,当围压较小时,失效面可以仅仅通过两个参数 f_t 和 f_c 来确定,其他 3 个参数取为: $f_{cb} = 1.2f_c、f_1 = 1.45f_c、f_2 = 1.725f_c$.

2.2.2 开裂模型

根据牛腿裂缝分布的特点,在有限元分析时采用弥散裂缝模型分析其开裂过程.弥散裂缝以

“连续的”裂缝形式分布于单元中,开裂的混凝土仍保持“连续性”,程序通过修正混凝土应力-应变关系对单元刚度矩阵进行调整.当裂缝产生后,后继荷载的作用会在裂缝表面产生滑动或剪切,程序引入裂缝张开时的裂面剪力传递系数 β_i 和闭合时的裂面剪力传递系数 β_c 来模拟开裂引起的混凝土抗剪能力的损失, β_i 一般取0.05~0.25,由于收敛性问题,本文取 $\beta_i=0.2$; β_c 一般取0.9~1.0,其值变化不大,本文取 $\beta_c=0.9$.

2.3 单元选择和荷载施加

2.3.1 单元类型

采用钢纤维混凝土和钢筋的分离式模型建模,不考虑钢筋与钢纤维混凝土的滑移.其中,钢筋采用 Link 8 单元,混凝土采用 Solid 65 单元^[7].

钢纤维由于数量众多且为乱向分布,不可能准确模拟每一根钢纤维的作用,故将钢纤维等效为微钢筋,按钢纤维体积率均匀分布在混凝土 solid 65 单元中,与混凝土组成整体式模型,即钢纤维沿坐标轴三向分布,每个方向按单元边长比例分配体积率,并考虑钢纤维方向有效系数的影响(取 $\eta_0=0.405$).此外,由于以钢纤维拔出时的拉应力作为钢纤维的抗拉强度,故不再考虑钢纤维和混凝土之间的粘结滑移.

在有限元分析中,如果约束直接加在混凝土节点上,可能在支座位置产生很大的应力集中,使支座附近的混凝土提前破坏,造成求解失败.故在有限元分析中,一般在支座上加一个弹性垫块,避免应力集中问题发生.笔者采用 Solid 45 单元模拟垫块.

2.3.2 网格划分

取牛腿试件整体模型进行分析时,单元网格划分的尺寸和形状都会影响模拟分析结果.经过比较,笔者取网格宽度为3 cm左右进行网格划分.此外,由于 Solid 65 单元是具有八节点的六面体单元,对应网格划分需要满足一定的几何拓扑规则,故分别给 X、Y、Z 方向指定合适尺寸进行单元划分,如图2所示.

2.3.3 边界条件和荷载施加

为了合理地模拟牛腿破坏的形态,在柱子端部施加 X、Y、Z 3 个方向的约束,在牛腿部分施加荷载.非线性分析时,通过定义荷载步和荷载子步将荷载分为一系列的荷载增量,有限元求解时在每一荷载增量内进行一系列的线性逼近以达到平衡.考虑到钢纤维混凝土材料非线性的影响,采用 Newton-Raphson 方法进行非线性迭代,收敛准则

采取力的无穷范数,收敛精度取为0.5%.

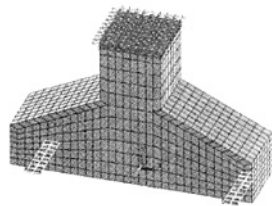


图2 牛腿有限元模型

Fig.2 Finite element model of corbels

3 计算结果分析

由 ANSYS 程序分析得到的牛腿试件正裂荷载与试验结果的对比见表1.正裂荷载的试验值与计算值之比的平均值0.968,标准差0.115,变异系数0.118,牛腿正截面抗裂荷载的有限元分析结果与试验结果吻合较好.表1的试验与计算结果均表明,钢纤维体积率 ρ_f 、混凝土强度和剪跨比(a/h_0)是影响钢筋钢纤维混凝土牛腿正截面抗裂性能的重要因素.有限元数值模拟分析得出的钢筋钢纤维混凝土牛腿正截面开裂荷载与钢纤维体积率、混凝土强度和剪跨比的关系分别见图3、图4和图5.可以看出,在普通混凝土牛腿中加入钢纤维后,其正截面的抗裂荷载随着钢纤维体积率的增加而提高.随着混凝土强度的增大,牛腿的正截面抗裂荷载逐渐增大;随着剪跨比的增大,牛腿的正截面抗裂荷载明显减小.下面根据 ANSYS 程序分析结果,重点分析混凝土和钢筋应变及裂缝随荷载的变化情况.

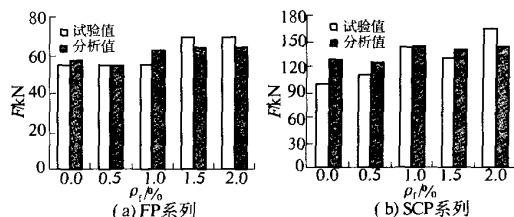


图3 牛腿开裂荷载与钢纤维体积率的关系

Fig.3 Relationship of cracking load with steel fiber volume ratio

3.1 混凝土应变

数值模拟得到的钢纤维混凝土应变云图如图6所示.在开裂之前牛腿试件混凝土和钢纤维混凝土的应变值均较小,增长幅度差别不大,如 FP-0、FP-1.0、SCP-40-0、SCP-40-1.0、SCP-50-1.0、SK-0.18、SK-0.54、SK-0.79 试件的应变分别为 0.810×10^{-4} 、 0.842×10^{-4} 、 0.840×10^{-4} 、 0.892×10^{-4} 、 0.931×10^{-4} 、 0.804×10^{-4} 、 0.872×10^{-4} 和 0.812×10^{-4} .

随着荷载的增大,牛腿混凝土开裂,应变迅速增长,上述试件的最大应变分别达到 $1.559\text{E-}03$ 、 $1.689\text{E-}03$ 、 $0.443\text{E-}03$ 、 $0.470\text{E-}03$ 、 $0.497\text{E-}03$ 、 $0.815\text{E-}04$ 、 $0.532\text{E-}03$ 和 $0.481\text{E-}03$. 在 50 kN 荷载作用下,上述试件的最大应变分别为 $0.610\text{E-}04$ 、 $0.587\text{E-}04$ 、 $0.302\text{E-}04$ 、 $0.287\text{E-}04$ 、 $0.276\text{E-}04$ 、 $0.243\text{E-}04$ 、 $0.383\text{E-}04$ 和 $0.548\text{E-}04$,在其他各子步荷载作用下变化规律基本相同,可见在相同荷载作用下,随着钢纤维体积率增大或混凝土强度提高,混凝土应变增长幅度减小;但是,随着剪跨比增大,混凝土的应变增长幅度增大.可见,掺入钢纤维或提高混凝土强度可以改善混凝土正截面的抗裂性能,而增大剪跨比会降低混凝土正截面的抗裂性能.

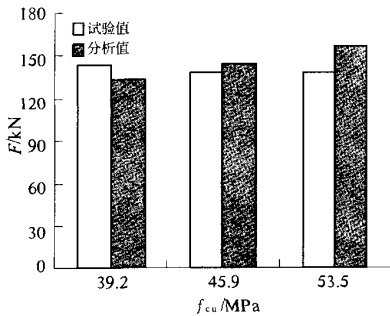


图4 牛腿开裂荷载与混凝土强度的关系
Fig.4 Relationship of cracking load with strength of steel fiber concrete

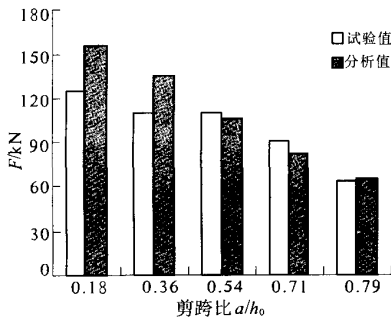


图5 牛腿开裂荷载与剪跨比的关系
Fig.5 Relationship of cracking load with shear span ration

3.2 钢筋应变

由数值模拟得到的钢筋应变可知,在开裂之前所有牛腿试件的纵向钢筋应变值均较小,FP-0、FP-1.0、SCP-40-0、SCP-40-1.0、SCP-50-1.0、SK-0.18、SK-0.54、SK-0.79 试件的最大应变分别为 $0.643\text{E-}04$ 、 $0.668\text{E-}04$ 、 $0.546\text{E-}04$ 、 $0.582\text{E-}04$ 、 $0.609\text{E-}04$ 、 $0.449\text{E-}04$ 、 $0.670\text{E-}04$ 和 $0.645\text{E-}04$.

随着正裂缝的出现及发展,与普通钢筋混凝土牛腿的性质类似,其纵向受力钢筋的应变增长迅速,上述试件的最大应变分别为 $0.378\text{E-}03$ 、 $0.372\text{E-}03$ 、 $0.175\text{E-}03$ 、 $0.192\text{E-}03$ 、 $0.205\text{E-}03$ 、 $0.455\text{E-}04$ 、 $0.247\text{E-}03$ 和 $0.229\text{E-}03$. 在 50 kN 荷载作用下,最大应变分别为 $0.472\text{E-}04$ 、 $0.454\text{E-}04$ 、 $0.196\text{E-}04$ 、 $0.187\text{E-}04$ 、 $0.180\text{E-}04$ 、 $0.136\text{E-}04$ 、 $0.288\text{E-}04$ 和 $0.429\text{E-}04$,可见在相同荷载作用下,纵筋应变随钢纤维体积率的增大而降低,主要原因在于裂缝处的钢纤维承担了一部分外荷产生的拉力,对钢筋混凝土牛腿裂缝的开展起到了有效的阻滞作用,从而降低了受拉钢筋的工作应力.此外,纵向钢筋应变的增长幅值随混凝土强度的增大而降低,随剪跨比的增大而增大.

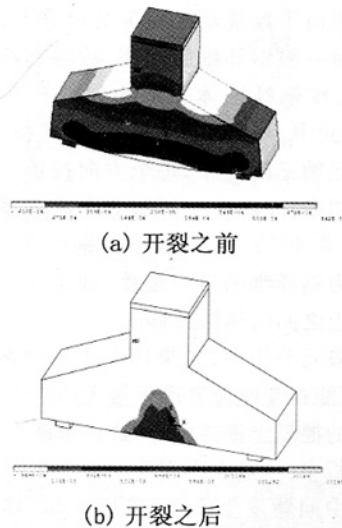


图6 钢纤维混凝土应变云图(FP-1.0)
Fig.6 Strain nephogram of concrete(FP-1.0)

3.3 裂缝分布

牛腿在 100 kN 荷载作用下的混凝土和钢筋纤维混凝土的裂缝分布见图7.应力一旦达到混凝土的抗拉强度,钢筋混凝土牛腿和钢筋纤维混凝土牛腿底面首先出现正裂缝,并随着荷载的增大不断延伸开展,剪跨比越大裂缝发展越迅速,但是钢筋纤维混凝土牛腿裂缝处的钢纤维会承担外荷产生的拉力,相应地提高了其抗裂能力.随着荷载继续增加,斜裂缝开始产生,裂缝数量逐渐增多.但是,在相同荷载作用下,掺入钢纤维牛腿的开裂单元明显比未掺入钢纤维的牛腿少,可见钢纤维掺入有效地抑制了混凝土裂缝的发展;此外,在相同荷载作用下,混凝土强度较高的牛腿开裂单元明显比混凝土强度低的牛腿少,剪跨比偏大

的牛腿开裂单元明显比剪跨比低的牛腿多,可见提高混凝土强度或减小剪跨比对混凝土裂缝的发展都有抑制作用。

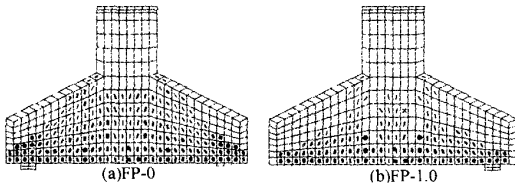


图7 牛腿裂缝分布对比图(100 kN)

Fig.7 Comparison of corbel cracks distribution(100 kN)

4 结论

(1)随着钢纤维体积率或混凝土强度的增大,牛腿正截面的抗裂荷载均有所提高;随着剪跨比的增大,牛腿正截面的抗裂荷载明显降低。

(2)掺入钢纤维、提高混凝土强度或减小剪跨比对混凝土裂缝的发展都有抑制作用。

(3)有限元数值模拟方法分析钢筋钢纤维混凝土牛腿抗裂性能的结果与试验结果吻合较好,

验证了有限元分析模型中所采用的单元类型、材料本构关系及破坏准则的可行性和合理性。

参考文献:

- [1] 中国工程建设标准化协会. CECS38:92 纤维混凝土结构技术规程[S]. 北京:中国工程建设标准化协会,1992.
- [2] 中华人民共和国建设部. GB50152—92 混凝土结构试验方法标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1992.
- [3] 中华人民共和国建设部. GB50010—2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [4] 高丹盈,刘建秀. 钢纤维混凝土基本理论[M]. 北京:科学技术文献出版社,1994.
- [5] 朱海堂,徐磊,高丹盈. 钢筋钢纤维混凝土牛腿正截面开裂弯矩的计算方法[J]. 水利水电技术,2004,35(5):35—37.
- [6] FATTUHI N I. Strength of FRC corbels in flexure[J]. Journal of Structural Engineering,1994, 120 (2):360—377.
- [7] 司炳君,孙治国,艾庆华. Solid65 单元在混凝土结构有限元分析中的应用[J]. 工业建筑,2007,37(1):87—92.

Nonlinear Finite Element Analysis on Cracking – resistance Behaviors of Steel Fiber Reinforced Concrete Corbels

ZHANG Jun – wei, GAO Dan – ying, ZHU Hai – tang

(Research Center of New Style Building Material and Structure, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Based on the experimental results of 17 steel fiber reinforced concrete corbels, the numerical simulation with nonlinear finite element method was adopted to analyze the behavior and to explore the influence of steel fiber volume ratio, the shear span ratio and the strength of concrete on cracking – resistance behavior of steel fiber reinforced concrete corbels. The result shows that the cracking – resistance behavior increases about 10 percent with the increase of the volume ratio of steel fibers, and the cracking – resistance behavior increases linearly with concrete strength, but the cracking – resistance behavior decreases markedly with the increase of shear span ratio. By contrasting the numerical simulation analysis results with the experiments, it proves the rationality of the unit type, material stress – strain relations and failure criteria used in the finite element analysis model. Therefore, it provides a reference for practical usage.

Key words: steel fiber reinforced concrete; corbel; cracking – resistance behavior; finite element analysis