第 35 卷 第 3 期 石家庄铁道大学学报(自然科学版) Vol. 35 No.3 2022 年 9 月 Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition) Sep. 2022

水泥基材料中倾斜钢纤维拔出性能数值模拟

毕继红^{1,2}, 张金波¹, 赵云¹, 王照耀¹, 李彩强¹

(1.天津大学建筑工程学院,天津 300072;2.天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室,天津 300072) 摘要:在水泥基材料中加入钢纤维能够显著提升其受拉韧性和残余抗拉强度,探明单根钢 纤维拔出机理是研究纤维增强水泥基复合材料及结构构件力学性能的前提条件。采用数值模 拟方法,首先建立了水泥基材料中钢纤维倾斜角度为0°时的二维有限元模型,对纤维拔出性能 进行了模拟。在此基础之上,考虑了倾斜纤维拔出时的基体剥落和挤压摩擦效应,建立了倾斜 钢纤维拔出有限元模型。通过与已有单根纤维拔出试验结果对比,验证了上述模型的正确性。 此外,探究了倾斜角度对纤维拔出性能的影响,结果表明,纤维倾斜角度在 25°~30°之间时,纤维 峰值拔出荷载最大。

关键词:纤维拔出;数值模拟;基体剥落;挤压摩擦效应;倾斜角度

中图分类号:TU528.572 文献标志码:A 文章编号:2095-0373(2022)03-0042-08

钢纤维是目前应用最广泛的纤维品类之一,钢纤维增强水泥基复合材料(Steel Fiber Reinforced Cementitious Composites, SFRCC)在开裂后,开裂界面的钢纤维发挥桥接作用,阻碍微裂缝的扩展,同时 阻滞宏观裂缝的发生和发展,从而能够显著提升其抗拉强度和韧性^[1]。已有研究^[2-6]表明,钢纤维增强水 泥基复合材料开裂后,嵌入水泥基材料中的钢纤维不断从基体中拔出,与基体共同承担外力,单根钢纤维 拔出性能的强弱影响着钢纤维的裂缝桥接能力,因此,研究单根钢纤维拔出性能对于优化 SFRCC 力学性 能和探明钢纤维增强增韧机理具有重要意义。

从 20 世纪 90 年代开始,大量研究者开始对单根钢纤维拔出性能进行试验研究。Leung et al^[2]通过单根 纤维拔出试验研究了钢纤维屈服强度和纤维倾斜角度对纤维拔出性能的影响,发现存在一个最佳的纤维倾 角和屈服强度能够使拔出力和拔出能达到最大。Jamal et al^[3]通过纤维拔出试验研究发现基体越密实纤维 拔出性能越强。Lee et al^[9]开展了高强水泥基材料中纤维拔出角度在 0°~60°时单根钢纤维拔出试验,发现 随着纤维倾斜角度的增加,峰值拔出荷载对应的纤维端部滑移不断增加,同时还通过引入表观剪切强度和滑 移系数的方法,提出了一种能够较好预测倾斜纤维拔出全过程的力学模型。上述研究发现,在倾斜纤维拔出 过程中,纤维弯曲变形会导致基体剥落,且基体剥落的程度随着倾斜角度的增大而增大,基体剥落会引起纤 维拔出力的减小。同时,在基体孔道出口处纤维弯曲将产生挤压摩擦,而挤压摩擦会引起纤维拔出力的增大。

虽然试验研究能够获取准确的试验数据,但是开展大量的参数化分析会消耗人力物力。随着计算机技术的发展,国内外学者开始尝试采用数值模拟方法研究钢纤维拔出性能。Zhang et al^[10]使用 ABAQUS 有限元分析软件,通过对钢纤维-基体界面摩擦规律的修正,研究了不同形状钢纤维的拔出行为;Zhang et al^[11]在钢纤维与基体之间插入粘结单元和接触单元,对倾斜钢纤维的拔出过程进行了模拟;Jamshid et al^[12]采用界面过渡区 ITZ 来模拟钢纤维与基体之间的界面,研究了纤维端部形状对其拔出性能的影响。

尽管已有许多关于纤维拔出性能的数值模拟研究,但是不同研究者采用的建模方法存在较大差异, 且已有研究中关于倾斜纤维拔出时基体剥落和挤压摩擦效应的内容仍旧较少,因此采用理论分析和数值 模拟相结合的方法,首先建立一种能够准确预测纤维倾斜角度为 0°时钢纤维拔出性能的二维有限元模

收稿日期:2022-03-24 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.20220069

基金项目:国家自然科学基金(51227006)

作者简介:毕继红(1965—),女,教授,研究方向为钢纤维自密实混凝土。E-mail:jihongbi@163.com

毕继红,张金波,赵云,等.水泥基材料中倾斜钢纤维拔出性能数值模拟[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2022,35(3):42-49.

型,并对其进行了试验验证;在该模型的基础上,考虑挤压摩擦效应和基体剥落,建立能够模拟倾斜钢纤 维拔出性能的有限元模型,进而探究倾斜角度对钢纤维拔出性能的影响规律。

倾斜角度为 0°时钢纤维拔出性能数值模拟 1

1.1 有限元模型建立

Leung et al^[7]的单根纤维拔出试验采用单侧加载的方法,试件尺寸为长 $25.4 \text{ mm} \times$ 宽 $12.7 \text{ mm} \times$ 高 9.5 mm,所用钢纤维直径 d 为 0.5 mm,纤维嵌入深度 L 为 10 mm。加载时利用分体式夹具夹紧纤维 的自由端,使纤维从基体中缓缓拔出。试验所用钢纤维和基体的材料属性如表1所示,其中,E为弹性模 量;v为泊松比; f_c 为混凝土抗压强度; f_t 为混凝土抗拉强度; f_y 为纤维屈服强度。

表1 钢纤维和基体材料属性

材料	$E/{ m GPa}$	υ	f_c/MPa	f_t/MPa	f_y/MPa
基体	30	0.2	36.5	3	—
钢纤维	210	0.3			635

43

· P

基于上述试验,采用有限元软件 ABAQUS 进行建 竖向约束 模。为了提高计算效率,选用二维模型进行模拟。通过 网格敏感性分析,发现沿钢纤维轴向按 0.25 mm 的网格 尺寸布种所得到的计算结果较为精确。基体两侧使用单 10 mm 精度方式布种,设置最小网格尺寸为 0.1 mm,最大网格 尺寸为1mm。其余部分通过全局布种,设置网格尺寸为 水平约束 由于模型为二维模型,故只需在基体左侧施加水平 约束,在上下两侧施加竖向约束。采取位移加载的方式, 竖向约束 控制钢纤维的拔出进程,模型的边界条件如图1(b)所示。

1.2 材料本构

1.2.1 **基体和纤维本构**

1 mm,如图 1(a)所示。

使用混凝土损伤塑性(CDP)模型对基体本构进行模拟,CDP 模型中的应力应变关系[13]定义为

$$\sigma_t = (1 - d_t) E_0(\varepsilon_t - \varepsilon_t^{pl}) \tag{1}$$

图 1 网格划分和边界条件

(a)网格划分

$$\sigma_c = (1 - d_c) E_0 (\varepsilon_c - \varepsilon_c^{p_l})$$
⁽²⁾

(3)(4)

式中, E_0 为基体的弹性模量; d_i 、 d_c 为受拉、受压本构曲线下降段所对应的损伤变量; ϵ_i 、 $\epsilon_i^{t'}$ 为拉应变、受 拉等效塑性应变;ε、、ε̃^μ为压应变、受压等效塑性应变。CDP 模型中所需的各项参数均通过混凝土结构 设计规范[14]提供的单向受拉和单向受压本构关系推导得到。此外,

与混凝土塑性相关的其他参数,如膨胀角、偏心率、双轴受压与单轴受 压强度比值、拉压子午线第二应力不变量和粘性系数,分别设定为 30、0.1、1.16、0.667 和 0.000 1。

考虑到纤维在拔出过程中可能会进入塑性,故钢纤维采用塑性强 化模型^[15],如图2所示,具体的应力-应变关系为

$$\sigma = E\varepsilon \quad (\varepsilon \leqslant \varepsilon_y)$$

$$\sigma = f_y + (\varepsilon - \varepsilon_y) \tan \theta \quad (\varepsilon_y \leqslant \varepsilon \leqslant \varepsilon_u)$$

$$; \tan \theta = \frac{f_u - f_y}{\varepsilon_u - \varepsilon_y} \circ$$

1.2.2 粘结单元本构

式中, $E = \frac{f_y}{\epsilon}$

在钢纤维拔出过程中,钢纤维与基体之间通过界面粘结进行应力传递。本文采用 ABAQUS 中的粘 结单元来模拟纤维与基体之间的界面,粘结单元力学属性选用牵引一分离定律,如图 3 所示。其中,T 为 切向的粘结强度; δ 为单元上下表面之间切向的相对位移。



(b)边界条件

图 2 钢纤维本构曲线

TA

 t_0

0

 δ_0

图 3 粘结单元本构

 δ_{f}

R

由图 3 可知,定义粘结单元的本构需要 3 个核心参数:曲线上 升段的斜率 K_n (单元刚度)、单元所能承受的粘结强度 t_0 以及单 元失效时上下表面之间的分离 δ_f 。本文中的单元刚度^[16]

$$K_n = \frac{E_m}{d\left(1 - v_m\right) \ln(R_m/r_f)} \tag{5}$$

式中, E_m 为基体的弹性模量; v_m 为基体泊松比; r_f 为钢纤维半径; R_m 为纤维拔出时基体受力区域的半径,一般可取 $10r_f$ 。

粘结强度

$$t_0 = \frac{P_{\text{max}}}{\pi dL} \tag{6}$$

单元破坏位移设定为 8 mm。此外,粘结单元本构中的损伤 起始判据选用 Maxs 损伤。

1.3 倾角为 0°时钢纤维拔出性能分析

1.3.1 模拟结果与试验结果对比

在钢纤维右侧截面施加水平荷载,使纤维向外拔出 2 mm。图 4 对比了试验和模拟的荷载 位移曲 线,可以发现,模拟所得峰值荷载预测值为 51.4 N,峰值位移预测值为 0.007 mm,都处于试验结果范围 内,模拟所得曲线在上升段与试验结果吻合良好。然而,在下降段初始阶段(拔出位移为 0.2~0.5 mm)模 拟得到的曲线略高于试验曲线,拔出位移超过 1.5 mm 后模拟得到的曲线略低于试验曲线,但是通过表 2 中拔出能(荷载-位移曲线与坐标轴所围成的面积)对比结果可以看出,试验与模拟得到的拔出能误差为 8.1%,表明数值模型整体上能够有效模拟拔出曲线下降过程。此外,由表 2 可知,峰值荷载预测值误差为 4.3%,峰值位移预测值误差为 6.7%,均在可接受的范围内,进一步证明了该模型的正确性。



图 4 荷载-位移曲线

表 2 0°倾角钢纤维拔出试验值与模拟值对比

数值	峰值荷载/N	峰值位移 /mm	拔出能/(N•mm)
试验值	53.6	0.007 5	34.56
模拟值	51.4	0.007 0	37.36

1.3.2 0°倾角纤维拔出过程分析

图 5 为拔出过程中粘结单元上粘结应力的变化过程。可以看出,当拔出位移为 0.001 mm 时,达到最 大粘结强度的粘结单元出现在纤维拔出端,沿纤维埋深方向的大部分粘结单元的粘结应力还很小,纤维 与基体之间处于完全粘结状态;随着拔出位移的增大,距离孔道出口较远处粘结单元的粘结应力不断增 大,当拔出位移为 0.004 mm 时,达到最大粘结强度的粘结单元位于距拔出端约 6 mm 处,纤维拔出端粘 结单元开始脱粘,相应的粘结应力减小为 3.286 MPa,但纤维末端粘结单元的粘结应力依然较小,此时纤 维与基体之间处于部分脱粘状态。当拔出位移为 0.007 mm 时,纤维末端粘结单元的粘结应力达到 3.3 MPa,其余部分粘结单元均发生脱粘,拔出端粘结应力降至 3.275 MPa,此时纤维拔出力达到峰值。在拔 出位移超过 0.007 mm 时,纤维和基体之间的粘结单元完全脱粘。此时钢纤维在拔出时的变形较小,可以 近似视作刚体,则纤维两侧不同位置粘结单元的相对位移基本相同,故从图 5 中可以看出,不同拔出位移 下的粘结应力分布曲线大致平行,都呈现出拔出端小、嵌入端大的特点。



图 5 粘结应力变化过程

2 倾斜钢纤维拔出数值模拟

2.1 模型建立

Laranjeira et al^[17]对倾斜纤维拔出过程进行了深入研究,发现纤维拔出力可以分解为沿纤维轴向和 垂直于纤维轴向的2个分力。其中,垂直于轴向的分力使纤维向下弯曲,挤压纤维底部的基体,造成基体 剥落,并提出了基体剥落长度计算公式

а

$$L_{sp}^2 + bL_{sp} + c = 0 \tag{7}$$

式中,*L*_{sp}为基体剥落长度;*a*、*b*、*c*分别为与纤维倾 角相关的3个参数。

$$\begin{cases} a = \frac{\sqrt{2}}{\sin \theta} + \frac{\cos \theta}{\sin^2 \theta} \\ b = \frac{d_f}{\sin \theta} \\ c = \frac{P_{\max} \sin \theta}{f_f} \end{cases}$$
(8)

通过式(7)、式(8),可求得 30°倾角对应的基体 剥落长度约为 1.2 mm。基于倾斜纤维的拔出特点, 提出一种能模拟倾斜纤维拔出过程的数值模拟方 法,即对纤维-基体之间粘结单元进行分区,其中基 体剥落长度范围内的粘结单元为考虑基体剥落的削 弱区(如图 6 所示),在计算分析时对该区域中粘结 单元的破坏位移进行削弱,使其在纤维拔出过程中



快速失效,以此来表征基体剥落对纤维拔出性能造成的减弱作用;此外,一些学者发现,随着倾斜钢纤维 的拔出,纤维弯曲会导致拔出端处纤维所受到的摩擦力增大,产生挤压摩擦效应,使钢纤维拔出力增大。 于是,考虑纤维造成的挤压摩擦效应,定义基体剥落长度范围之外的粘结单元为增强区。采用文献[9]建 议的计算公式,将基体孔道出口处的挤压摩擦效应均分至增强区的每一个粘结单元,增强区内粘结单元 的粘结强度按照增强因子 α,mub进行增强。

$$\alpha_{snub} = e^{0.6\theta}$$

(9)

2.2.1 模拟结果与试验结果对比

图 7 对比了模拟结果与试验结果,可以发现,模拟所得到的拔 出荷载-位移曲线均处于试验曲线所围成的区域内,说明建立的倾 斜钢纤维拔出数值模型能够较好地模拟倾斜钢纤维拔出过程,同 时间接说明该模型能够准确表征倾斜钢纤维引起的基体剥落和挤 压摩擦效应。表 3 对比了试验和模拟得到的峰值荷载、峰值位移 和拔出能,可以看出,峰值荷载相对误差为5.3%,峰值位移相对误 差为 2.9%,拔出能相对误差为 12.5%,进一步说明了所采用建模 方法的有效性和精确性。



表 3 30°倾角钢纤维拔出试验值与模拟值对比

数值	峰值荷载/N	峰值位移/mm	拔出能/(N・mm)
试验值	66.04	0.069	89.26
模拟值	62.51	0.071	78.06

2.2.2 倾斜纤维拔出过程分析

图 8 给出了倾斜纤维在拔出时钢纤维和基体的变形过程。当拔出荷载较小时,钢纤维两侧粘结单元 尚未破坏,纤维与基体的变形均较小,如图 8(a)所示。随着拔出位移增大,垂直于纤维轴向的拔出荷载分 力逐渐增大,使得纤维拔出端上部的粘结单元最先发生脱粘破坏。同时,脱粘部分的钢纤维开始产生弯 曲变形并逐渐挤压出口处的基体,迫使基体出现较大的变形,如图 8(b)所示。随着纤维与基体之间相对 位移的不断增加,纤维两侧更多粘结单元发生脱粘破坏,如图 8(c)所示。相应地,孔道出口处纤维弯曲变 形以及纤维下方约 1.2 mm 长度范围内的基体变形更大。综合以上分析,在纤维拔出过程中,随着拔出位 移的增大,孔道出口处纤维底部的基体变形明显增大,变形较大的基体部分就可能发生剥落,且基体变形 较大的区域与计算所得基体剥落范围相近,说明数值模型能够模拟基体剥落现象。



第3期

3 纤维倾斜角度对拔出性能的影响

纤维倾斜角度对纤维拔出性能具有重要的影响,因此,有必要研究纤维倾斜角度对纤维拔出性能的 影响规律,从而为优化钢纤维拔出性能提供参考。采用本文提出的分区建模方法,按照 5°的间隔,建立了 从 10°~55°共 10 个模型,图 9 给出了详细的计算结果。



图 9 10°~55°荷载-位移曲线

由图 9 可知,当倾角为 10°~30°时,不同倾角的荷载-位移曲线在上升段的差异不大,达到峰值荷载 后,曲线下降趋势基本一致;当倾角为 35°~55°时,在拔出开始,不同倾角的荷载-位移曲线基本重合,随着 荷载的增大,倾角更大的曲线斜率出现下降,且对应的峰值后曲线下降速率更小。如图 10 所示,纤维倾 角从 10°增加至 25°时,峰值荷载从 55.5 N 增加至 62.9 N。纤维倾角为 30°时,峰值荷载为 62.5 N。随着 倾角继续增大,峰值荷载逐渐减小,倾角为 55°时,峰值荷载降至 32.7 N。因此,从峰值拔出荷载角度看, 本文研究的钢纤维增强水泥基复合材料的最佳纤维倾角为 25°~30°。相应地,纤维倾角从 10°增加至 30° 时,拔出能由 70.30 N•mm 增加至 78.06 N•mm,纤维倾角超过 30°后,拔出能开始下降,倾角为 55°时, 拔出能仅为 50.30 N•mm。此外,当纤维倾角由 10°增加至 55°时,峰值位移不断增大,由 0.053 mm 增加 至 0.210 mm。



分析可知,加载初期纤维-基体之间粘结单元处于弹性状态,因此荷载-位移曲线基本一致,而随着荷载不断增大,倾角较大的纤维会引起基体剥落,导致纤维位移不断增大,使得曲线斜率下降。当纤维倾斜拔出时,基体剥落和挤压摩擦效应同时作用,基体剥落会造成纤维拔出力减小、峰值位移增大,而挤压摩 擦效应会增大纤维拔出力。纤维倾角的增加会导致基体剥落长度增加,同时会增强挤压摩擦效应,但是 基体剥落和挤压摩擦效应对拔出性能指标的贡献程度也会随纤维倾角的增加而不断变化。当纤维倾斜 角度较小(小于 30°)时,孔道出口处钢纤维弯曲程度较小,造成的基体剥落长度相对较小,此时挤压摩擦 效应起主要作用,随着纤维拔出角度的增大,峰值拔出荷载和拔出能均增大。当倾斜角度较大(大于 30°) 时,孔道出口处钢纤维弯曲程度较大,导致基体剥落长度增大,故基体剥落引起的减弱作用超过挤压摩擦 效应造成的增强作用,因而随着纤维倾斜角度的增大,峰值荷载和拔出能逐渐减小,但是纤维倾角越大对 应的挤压摩擦增强因子更大,使得曲线下降速率减小。

4 结论

采用有限元模拟方法对钢纤维增强水泥基材料中单根纤维拔出性能进行了研究,建立了一种新的二 维有限元模型,同时,探究了钢纤维倾角对纤维拔出性能的影响规律,得到了以下结论:

(1)倾斜角度为 0°的钢纤维拔出时,纤维-基体之间的粘结单元会经历完全粘结、部分脱粘和完全脱粘 3 个阶段,且当粘结单元完全脱粘时,纤维拔出力达到峰值。

(2)倾斜钢纤维拔出性能数值模拟与试验结果在峰值荷载、峰值位移和拔出能 3 个方面的误差分别为 5.3%、2.9%和 12.5%,表明提出的数值模拟方法能够有效地表征倾斜纤维拔出时的基体剥落现象和挤压摩擦效应,从而准确模拟倾斜纤维的拔出过程。

(3)纤维倾斜角度对纤维拔出力学性能有较大影响,随着纤维倾角的增大,纤维拔出时的峰值拔出荷 载和拔出能先增大后减小,而峰值位移不断增大。从峰值荷载角度看,最佳纤维倾斜角度在 25°~30° 之间。

参考文献

- [1]毕继红,王照耀,霍琳颖,等. 钢筋钢纤维混凝土梁弯矩-裂缝宽度计算方法[J]. 水力发电学报, 2021, 40(1): 32-42.
- [2]Yassir M, Iqbal M. Fiber-Matrix interactions in fiber-reinforced concrete: a review[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2016, 41(4): 1183-1198.
- [3]Pi Zhenyu, Xiao Huigang, Li Hui. Influence of interfacial microstructure on pullout behavior and failure mechanism of steel fibers embedded in cement-based materials[J]. Construction and Building Materials, 2021, 304: 124688.
- [4] Huang Lian, Yuan Ming, Wei Bingdeng, et al. Experimental investigation on sing fiber pullout behaviour on steel fibermatrix of reactive powder concrete (RPC)[J]. Construction and Building Materials, 2022, 318: 125899.
- [5]赵一鹤,孙振平,穆帆远,等. 钢纤维对 UHPC 拉伸性能及其拔出行为的影响[J]. 建筑材料学报,2021,24(2):276-282.
- [6]毕继红,王雪冬,赵云,等.考虑纤维取向的自密实混凝土梁抗弯性能分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2021, 34(3): 1-7,59.
- [7]Leung C, Shapiro N. Optimal steel fiber strength for reinforcement of cementitious materials[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1999, 11: 116-123.
- [8]Jamal M,Brincker R, Hansen W. Pullout behavior of steel fibers from cement-based composites[J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(6): 925-936.
- [9]Lee Y, Kang S, Kim J. Pullout behavior of inclined steel fiber in an ultra-high strength cementitious matrix [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(10): 2030-2041.
- [10]Zhang Chaohui, Shi Caijun, Wu Zemei, et al. Numerical and analytical modeling of fiber-matrix bond behaviors of high performance cement composite [J].Cement and Concrete Research, 2019, 125: 105892.
- [11]Zhang Hui, Yu R. Inclined fiber pullout from a cementitious matrix: a numerical study [J]. Materials, 2016, 9: 1-24.
- [12]Jamshid E, Keyvan A, Osman G, et al. Pull-out and bond-slip performance of steel fibers with various ends shapes embedded in polymer-modified concrete [J]. Construction and Building Materials, 2021, 271: 121531.

[13]刘巍,徐明,陈忠范. ABAQUS 混凝土损伤塑性模型参数标定及验证[J]. 工业建筑, 2014, 44(S1): 167-171, 213.

[14]高文安. GB 500101-2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

[15]过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 北京:清华大学出版社,2013.

- [16]Kullaa J. Dimensional analysis of bond modulus in fiber pullout[J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(7): 783-787.
- [17]Laranjeira F, Aguado A, Molins C. Predicting the pullout response of inclined straight steel fibers[J]. Materials and Structures, 2010, 43: 865-875.

Numerical Simulation for Pullout Behavior of Inclined Steel Fiber in Cement—Based Materials

Bi Jihong^{1,2}, Zhang Jinbo¹, Zhao Yun¹, Wang Zhaoyao¹, Li Caiqiang¹

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of China Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Adding steel fibers to cement-based materials can significantly improve its tensile toughness and residual tensile strength. Investigating the pullout mechanism of the single steel fiber is a prerequisite for studying the mechanical properties of fiber reinforced cement-based composites and structural components. In this paper, the numerical simulation method was adopted. Firstly, the two-dimensional finite element model of the steel fiber (inclination angle 0°) in the cement-based material was established, and the fiber pullout behavior was simulated. Also, considering the matrix spalling and snubbing effect, the finite element models of the inclined steel fibers were established. The accuracy of the above models was verified by comparing the simulated results with the existing single fiber pullout test data. Furthermore, the effect of the inclined angle on the fiber pullout behavior was studied. The results show that the peak pullout load reaches the largest value when the fiber inclination angle is between 25° and 30°.

Key words: fiber pullout; numerical simulation; matrix spalling; snubbing effect; inclined angle

(上接第 22 页)

Influence Rules of Width—Height Ratios on Aerodynamic Force Characteristics and Flow Field Mechanisms of Flat Box Girder

Fan Jiahao¹, Liu Huijie¹, Jiang Huimin¹, Liu Xiaobing^{1,2,3}, Yang Qun^{1,2,3}

School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
 Innovation Center for Wind Engineering and Wind Energy Technology of Hebei Province, Shijiazhuang 050043, China;
 State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures,

Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In order to study the influence of width-height ratios on aerodynamic force characteristics and flow field mechanism of flat box girder, the numerical simulation of four flat box girder with different width-height ratios was carried out at seven wind attack angles, and the three-component force coefficient, wind pressure coefficient and time-average flow diagram of flat box girder were obtained with the preliminary design of a cross-sea bridge as the research background. The results show that the drag coefficient of flat box girder is significantly affected by width-height ratios than lift coefficient and torque coefficient. With the increase of width-height ratios, the flat box girder will suffer less resistance, but more lift force and torque. The positions of vortices formed by flat box girders with different widthheight ratios are basically the same, but their sizes and intensities are different, which directly lead to the changes of aerodynamic forces on flat box girders.

Key words: streamlined box girder; width-height ratio; wind attack angle; three-component force coefficient; wind pressure coefficient; time-mean flow diagram