

钢纤维混凝土离心成型工艺试验研究

赵顺波 李凤兰 张吉红

(华北水利水电学院土木与交通学院 郑州 450011)

摘要: 针对钢纤维混凝土离心成型时各工艺参数的确定进行系列试验研究。通过对离心成型环形截面钢纤维混凝土试件的切片试验, 研究离心时间、离心加速度、粗骨料级配、钢纤维的长度和体积率等因素对钢纤维在构件横截面、纵截面的分布形态的影响规律, 确定了将离心成型钢纤维混凝土应用于输变线路电杆时的各参数取值范围, 为工程应用提供科研依据。

关键词: 建筑材料 离心成型 试验研究 钢纤维混凝土 纤维分布规律

离心成型混凝土被广泛应用于电杆、管道、管柱和管桩等环形截面预制构件, 但这些构件在生产、运输或运行过程中常常出现纵向或环向的裂缝等病害, 造成混凝土内钢筋锈蚀和混凝土性能劣化加剧, 导致构件正常使用性能和承载能力显著下降^[1-3]。从本质上提高混凝土材性的角度出发, 利用钢纤维增强混凝土为优选途径之一^[4]。为了达到有效利用钢纤维增强离心成型混凝土力学性能并提高其耐久性能的目的, 作者通过对钢纤维混凝土中钢纤维、固体颗粒和水泥浆体在离心成型过程中运动规律的分析, 提出了纤维分布理论模型, 通过试验初步验证了钢纤维体积率、混凝土强度及配置钢筋等因素对纤维分布的影响规律, 为开发离心成型钢纤维混凝土电杆新产品提供了研究依据^[5-7]。本文进行了系列试验研究以便更加合理地确定钢纤维混凝土离心成型工艺参数。

1 试验概况

离心成型钢纤维混凝土环形截面试件, 截面尺寸均相同, 其外径为55cm、壁厚为7.0cm。基体混凝土强度等级为C60, 选用等级为52.5的普通硅酸盐水泥, 中砂, 粒径为5~10mm和5~15mm的连续级配碎石。纤维采用压痕端头剪切型钢纤维, 等效长度 $l_f=19\text{mm}$ 、25mm、32mm和40mm, 等效直径 $d_f=0.6\text{mm}$, 纤维体积率 $\rho_f=0.8\%$ 、1%、1.2%、1.5%。各试验参数的组合情况列入表1, 其中离心成型中速阶段的基准

时间和基准加速度通过前期理论分析和试验确定^[8], 共成型试件6根, 每根4段, 每段长度1.5m。

每种试件用金刚锯切割成长度为20cm的环形截面短试件, 统计钢纤维在横截面上的分布规律。然后再按20°圆心角进行纵向切片, 统计钢纤维在纵截面上的分布规律。

表1 试验参数的组合情况

试件	碎石粒径 /mm	钢纤维	
		l_f/mm	$\rho_f/\%$
第1根, 中速阶段 离心时间延长	5~10	19、25、32、40	1.0
第2根, 中速阶段 离心加速度增大	5~15	19、25、32、40	1.0
第3根, 基准离心 时间和加速度	5~10	19、25、32、40	1.0
第4根(含1段素混 凝土), 基准离 心时间和加速度	5~10	25	0.8、1.2、1.5
第5根, 基准离心 时间和加速度	5~15	19、25、32、40	1.0
第6根(含1段素混 凝土), 基准离 心时间和加速度	5~15	32	0.8、1.2、1.5

由于钢纤维分布规律研究是一个数理统计的过程, 所以首先对所研究的断面划分网格。横截面在厚度方向上划分成5层, 由外至内分别是0.5cm、1.0cm、1.5cm、1.5cm和2.5cm, 环向按每20°圆心角划分成一层单元; 纵截面厚度方向上与横截面相同划分, 在长度方向上每4cm划分一层单元, 如图1所示。

钢纤维分布规律的统计参数为沿截面厚度方向上各层单元中的纤维分布率和分散系数^[6], 纤

注: 《大型无拉线离心成型预应力钢纤维混凝土杆塔》项目获第三届欧维姆预应力技术奖三等奖。本文原载《水力发电学报》2008年第5期

维分布率表示纤维的分布密度,反映了各层单元单位截面面积(取 1cm^2)上钢纤维的根数。纤维分散系数反映了各层单元中纤维分布的均匀程度,其值为 $0\sim 1$ 之间的数,值越大表示纤维在该层的分布越均匀。

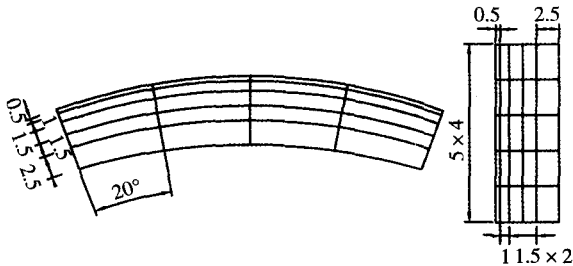


图1 钢纤维分布规律统计单元的划分(尺寸单位: cm)

2 试验结果分析

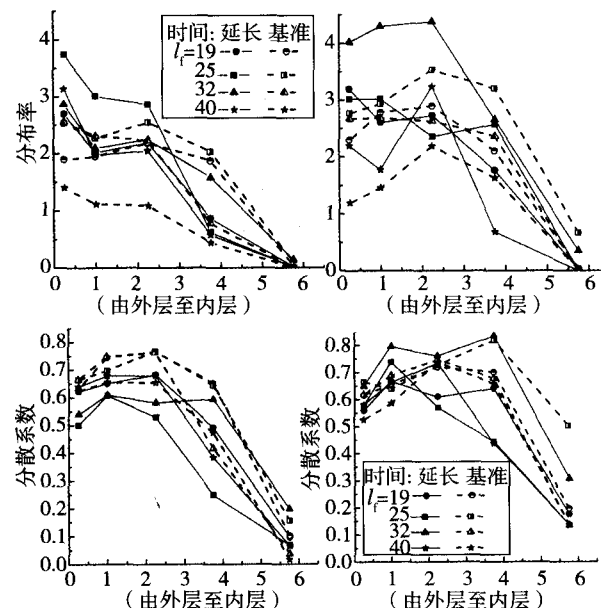
结合环形截面构件的受力特点,从提高构件受力性能特别是抗裂能力的角度出发,确定合理的离心成型工艺参数就是使钢纤维尽可能在环形截面外侧分布,以便尽可能地发挥钢纤维对混凝土的增强作用。本试验考察钢纤维在环形截面外三层单元格内垂直于横截面(沿构件纵向)和垂直于纵截面(沿构件环向)的分布优劣情况。

2.1 中速阶段离心时间延长对纤维分布的影响

图2为第1根、第3根试件的垂直于横、纵截面的钢纤维分布率和分散系数在截面厚度方向上的变化曲线,可以看出,在离心力作用下钢纤维均趋向于构件截面的外环分布,中速阶段离心时间延长有利于这种趋向的进一步发展,但对不同纤维长度的钢纤维分布形态具有不同的影响效果。根据理论分析模型^[5],在粗骨料级配为 $5\sim 10\text{mm}$ 时,10mm粒径骨料的沉降速度约为5mm粒径骨料的4倍,所需沉降时间则约为 $1/4$;纤维长度 $l_f=19\text{mm}$ 、25mm、32mm、40mm的钢纤维的沉降速度约为10mm粒径骨料的1.15、1.50、1.92、2.4倍,离心时间延长有利于发挥作用在钢纤维上的离心沉降力和剪切摩擦力对纤维分布方向的调整效应,使钢纤维取向由三维乱向朝着以构件纵轴为中心轴的柱面二维状态发展。因此,粗骨料按粒径大小在截面厚度方向上形成规律比较明显的分层分布状态。离心时间延长后,相对于钢纤维来说沉降自由度更大的粗骨料迅速挤占了外层

截面空间,沉降速度较小、长度 $l_f=19\text{mm}$ 的短纤维向外层沉降并沿纵向分布时须克服外层粗骨料垂直作用于钢纤维全长上的剪切摩擦力,从而导致其沿纵向的沉降和取向难度加大,表现为钢纤维沿纵向的分布率变化不大和分散系数的减小;但趋于环向分布的钢纤维在环向离心沉降力的带动下,在离心时间延长的条件下增大了突破外层粗骨料阻碍的可能性,更易于在截面外层沿环向分布,表现为钢纤维沿环向的分布率明显增大。

由于最外层钢纤维的沉降和取向过程不仅受到该层较大粒径骨料的阻碍,还受到试件外侧钢模板的阻滞,同时由于在混凝土入模初始状态时较短的钢纤维易于聚集成堆而增大了分布的离散性,较长的钢纤维因总体根数较少则增大了其分布的随机性,所以其分布均匀程度较差,分散系数较小。



(a) 横截面(纵向钢纤维) (b) 纵截面(环向钢纤维)

图2 离心时间延长时的截面纤维分布率和分散系数变化规律

相对而言,离心时间延长对长度较小的钢纤维沿环向分布的改善效果明显,对长度较大的钢纤维沿纵向分布的改善效果明显,纤维长度 $l_f=19\text{mm}$ 的钢纤维更易于在截面外层沿环向分布, $l_f=40\text{mm}$ 的钢纤维更易于在截面外层沿纵向分布,而 $l_f=25\text{mm}$ 、32mm的钢纤维在截面外层的分布率明显增大,但分布的均匀性有所降低,纤维分散系数减小。

2.2 中速阶段离心加速度增大对纤维分布的影响

图3为第2根、第5根试件的垂直于横、纵截面的钢纤维分布率和分散系数在截面厚度方向上的变化曲线。根据理论分析模型^[5],粗骨料和钢纤维的沉降速度与离心加速度成正比,因此增加离心加速度会同增加粗骨料和钢纤维的沉降速度,但由于粗骨料和钢纤维、不同长度的钢纤维在沉降过程中受到的约束情况因其相对运动的差异而不同,致使钢纤维在构件截面上的分布有所不同。在粗骨料级配为5~15mm时,5mm、10mm、15mm粒径骨料的沉降速度比值约为1:4:9,本试验所用长度 $l_f=19\text{mm}$ 、25mm、32mm钢纤维的沉降速度均低于15mm粒径骨料,仅长度 $l_f=40\text{mm}$ 钢纤维的沉降速度与15mm粒径骨料相当,因而粗骨料按粒径大小在截面厚度方向上形成了分层分布的状态,增大离心加速度后,截面外层较快形成了以15mm粒径骨料为主体的混凝土环,其拌合物流动性低于内部以10mm、5mm粒径骨料为主体的混凝土环,对钢纤维沉降和取向调整的阻滞作用增强,使钢纤维趋于在外环层以内的环层上分布,内环层的分布均匀性提高,分散系数增大,而最外环层钢纤维分布率和分布均匀性有所降低(图3)。

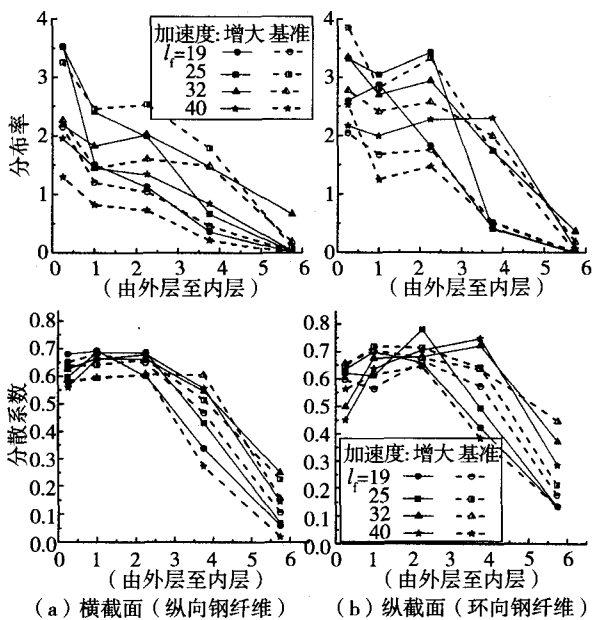


图3 离心加速度增大时的截面纤维分布率和分散系数变化规律

由于离心沉降过程中钢纤维受到离心沉降力和剪切摩擦力的作用,离心加速度增大对钢纤维沿截面环向分布的改善效果较为明显,对钢纤维沿截面纵向分布的改善效果则随着钢纤维长度的增大而提高。整体而言,纤维长度 $l_f=19\text{mm}$ 、25mm的试件,离心加速度适当增大可使钢纤维在环向的分布率提高,分布均匀性增大;纤维长度 $l_f=32\text{mm}$ 、40mm的试件,离心加速度适当增大可使钢纤维获得较好的环向和纵向分布形态。

2.3 粗骨料级配变化对纤维分布的影响

图4为第3根、第5根试件的垂直于横、纵截面的钢纤维分布率和分散系数在截面厚度方向上随骨料级配的变化曲线,可以看出,由于粗骨料级配变化改变了混凝土拌合物中骨料粒径的组成,使混凝土在离心成型过程中粗骨料按粒径大小在截面厚度方向上的分层状态发生改变,影响了粗骨料与钢纤维之间的相对运动关系。比较5~10mm和5~15mm两种骨料级配,前者因粗骨料粒径较小,对钢纤维沉降和取向运动的阻滞作用也较小,从而有利于钢纤维在离心运动过程中趋向于以构件纵轴为中心轴的柱面分布,并改善其分布的均匀性,在同样的钢纤维长度和体积率条件下,骨料级配5~10mm时纤维分布率高于骨料级配5~15mm时纤维分布率,纤维分布的均匀性也好于骨料级配5~15mm时纤维分布的均匀性。同时,在同种骨料级配情况下,由于短纤维在沉降和取向过程中受到的骨料阻滞作用较小,沉降运动和取向转角的自由度较大,其分布的均匀性好于长纤维。

综合而言,骨料级配5~10mm时,长度 $l_f=19\text{mm}$ 、25mm、32mm的钢纤维可获得较好的环向和纵向分布形态;骨料级配5~15mm时,长度 $l_f=25\text{mm}$ 、32mm的钢纤维可获得较好的环向和纵向分布形态;因长度 $l_f=40\text{mm}$ 的钢纤维分布均匀性较差而不宜采用。

2.4 纤维体积率变化对纤维分布的影响

图5为粗骨料级配5~10mm、纤维长度 $l_f=25\text{mm}$ (第3根、第4根试件)和粗骨料级配5~15mm、纤维长度 $l_f=32\text{mm}$ (第5根、第6根试件)时垂直于横、纵截面的钢纤维分布率和分散系数在截面厚度方向上随纤维体积率的变化曲线。可

可以看出,其他条件相同时,纤维分布率随着纤维体积率的增大而增大;但是,当钢纤维体积率 $\rho_f=1.5\%$ 时,在截面外层出现了粗骨料间钢纤维聚集的现象,粗骨料级配5~15mm时的聚集情况多于粗骨料级配5~10mm时,因此以前者离心成型试件的钢纤维分布均匀性较差,纤维分散系数较小;当钢纤维体积率 $\rho_f=0.8\%$ 时,由于混凝土中钢纤维的总根数较少,钢纤维分布的随机性增大,不仅使截面上钢纤维分布率较低,而且分布均匀性较差,纤维分散系数较小。

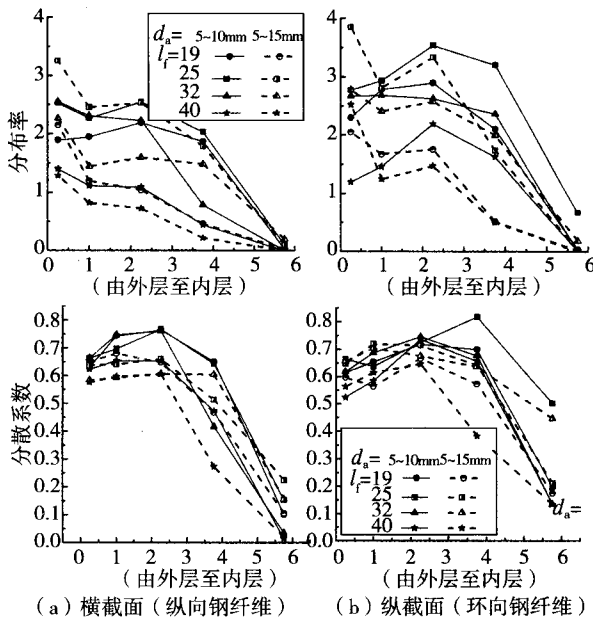


图4 粗骨料级配变化时的截面纤维分布率和分散系数变化规律

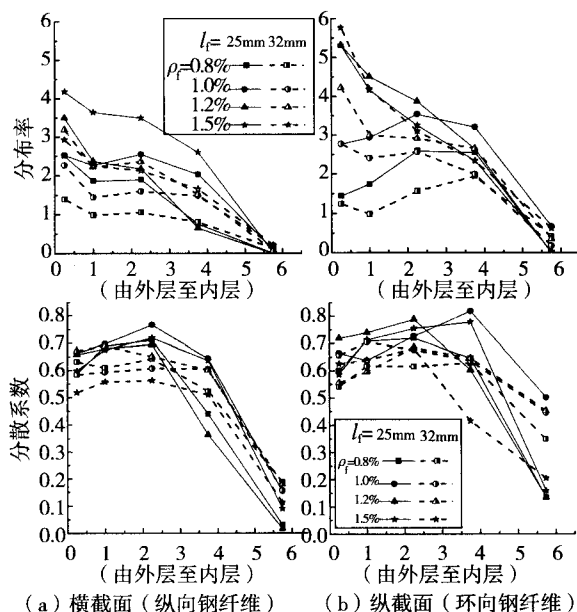


图5 纤维体积率变化时的截面纤维分布率和分散系数变化规律

在同样体积率条件下,钢纤维根数随着纤维长度的减小而增多,从而增加了钢纤维在截面纵向和环向分布的几率,不仅增大了截面上的纤维分布率,而且使纤维分布的均匀性增加,分散系数也随之增大。

总体上看,纤维体积率 $\rho_f=1.0\%$ 、 1.2% 的试件,钢纤维在截面厚度方向上均可获得较好的环向和纵向分布形态。

3 结论

根据理论分析和前期试验研究确定的钢纤维混凝土离心成型中速阶段的离心时间和离心加速度(本文所述基准值)是基本合适的。适当延长中速阶段的离心时间、增大中速阶段的离心加速度,有利于改善钢纤维在构件截面外层的分布状态,但改善效果因钢纤维长度的不同而不同。

对于大直径钢纤维混凝土电杆,可选取粗骨料级配5~10mm、钢纤维长度 $l_f=15\sim 32$ mm、钢纤维体积率 $\rho_f=1.0\%\sim 1.2\%$ 或粗骨料级配5~15mm、钢纤维长度 $l_f=25\sim 32$ mm、钢纤维体积率 $\rho_f=1.0\%\sim 1.2\%$,进行钢纤维混凝土配合比设计,此处钢纤维长度下限值通过本次试验并结合《纤维混凝土结构技术规程》(CECS38:2004)的有关规定确定。

参考文献

- [1] 苏格兰. 离心式钢筋混凝土管涵设计与成型工艺的探讨[J]. 湖南交通科技, 2000, 26(4):53~55.
- [2] 雷预枢. 环形截面预应力混凝土电杆纵向裂缝的研究[J]. 土木工程学报, 1994, (3):59~66.
- [3] 夏威. 高强预应力混凝土离心管桩的致裂因素及其控制方法[J]. 水运工程, 1994, (5):41~44.
- [4] 赵国藩, 彭少民, 黄承逵. 钢纤维混凝土结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [5] 张云国, 赵顺波, 温世臣. 离心成型钢纤维混凝土纤维分布理论研究[J]. 建筑材料学报, 2005, (4):361~367.
- [6] 张云国, 赵顺波, 张天光. 离心成型钢纤维混凝土纤维分布规律试验研究[J]. 材料科学与工程学报, 2004, (4):602~606.
- [7] 高润东, 赵顺波, 张天光. 离心成型钢筋混凝土电杆受力性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, (8):43~48.
- [8] 赵顺波, 张波, 李晓克. 钢纤维混凝土电杆的离心成型工艺[A]. 纤维混凝土的技术进展与工程应用[C]. 大连理工大学出版社, 2006:350~357.
- [9] CECS38:2004. 纤维混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.