

# 喷射混凝土钢纤维分布特性分析

## Analysis on distributions of steel fiber in reinforced shotcrete

高尔新, 李元生, 薛 玉, 张德存  
(中国矿业大学北京校区 资源开发工程系, 北京 100083)

**摘 要:** 通过钢纤维在喷射混凝土中的受力特性分析, 说明在以单位球为研究对象时, 钢纤维在混凝土中服从球面上的 Fisher 分布, 其长轴指向与受喷射面基本平行, 这样的分布特性, 有利于抵抗巷道由于变形而产生的破坏。

**关键词:** 钢纤维; 喷射混凝土; 方向数据

中图分类号: TD 353.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2002)02-0202-02

**作者简介:** 高尔新(1954-), 男, 安徽合肥人, 博士, 教授, 主要从事爆炸理论、岩土工程的教学与科研工作。

GAO Er-xin, LI Yuan-sheng, XUE Yu, ZHANG De-cun

(Department of Resources Exploitation Engineering, Beijing Campus, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Distributions of steel fiber in reinforced shotcrete has been analyzed and it is proved that the distributions of steel fiber in reinforced shotcrete accords with Fisher distributions.

**Key words:** steel fiber; shotcrete; direction data

### 1 前 言\*

钢纤维喷射混凝土是一种近年来在国际和国内迅速发展新型复合材料, 和普通混凝土相比, 它具有更优越的抗拉、抗弯、抗剪、耐疲劳和高韧性等性能, 因此被广泛用于建筑、桥梁、水工、军事工程和地下工程中。在钢纤维混凝土中, 钢纤维有效地阻碍了混凝土内部裂缝的扩展并阻滞了宏观裂缝的产生与发展, 显著地提高了混凝土强度特性。因而, 研究它在三维空间的分布, 对分析复合体受力特性更具有重要意义<sup>[1]</sup>。

本文采用力学分析与方向数据方法, 说明钢纤维在喷射混凝土中服从 Fisher 分布, 其长轴指向与受喷射面基本平行, 这样的分布特性, 有利于抵抗巷道由于变形产生的破坏, 同时分析了钢纤维喷射混凝土的有关力学指标, 并将计算结果与实测结果进行了对比。

### 2 钢纤维的分布特性分析

假设喷射混凝土经由混凝土喷射机以一定的速度喷向巷道表面 A 点, 在喷射点 A 受到巷道表面的阻碍而向四周流动, 其受力特性如图 1 所示。

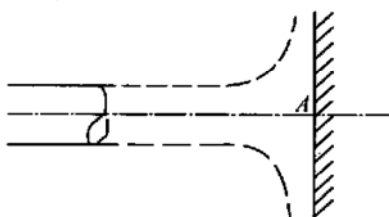


图 1 混凝土在喷射点 A 的流动

Fig. 1 The flow of shotcrete at point A

将喷射混凝土作为理想不可压缩流体来处理, 将坐标原点放在点 A, 设整个流动过程是定常理想不可压缩流体的流动过程, 应用柏努利公式, 得到

$$P_A = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (1)$$

式中  $P_A$  为 A 点所受到的冲击力;  $\rho$  为喷射混凝土的密度;  $V$  为喷射混凝土的速度。

假设钢纤维在喷射过程中是均匀的而且是乱向的, 当它与巷道表面相撞击后, 将受到  $P_A$  作用而发生翻转, 其翻转力矩为

$$M_A = P_A l \sin \theta \quad (2)$$

式中  $l$  为钢纤维长度;  $\theta$  为钢纤维与喷射轴线的内夹角。

根据受力分析, 当  $\theta = 90^\circ$  时, 由于钢纤维紧贴巷道表面, 将不会发生翻转, 所以  $M_A$  实际上可看作是钢纤维在空间三维坐标中的概率分布密度特征, 即

$$F_A(\theta) = \frac{1}{2} \rho V^2 l \sin \theta \quad (3)$$

分析式(3)可看出, 式(3)具有 Fisher 分布的数字特征, 可看成是分布参数  $K$  为 0 时的 Fisher 分布。当混凝土的喷射方向不是和巷道岩壁的法向垂直时, 可推论钢纤维在三维球面空间的分布服从如下 Fisher 分布<sup>[2]</sup>:

$$g_x(\theta, \rho) = \frac{C(K)}{2\pi} \exp[ K \cos \mu_0 \cos \theta + K \sin \mu_0 \cos(\varphi - \gamma_0) ] \sin \theta \quad (4)$$

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70072033)

收稿日期: 2001-06-14

如果取总体平均方向为极轴方向即巷道岩壁的法向方向, 则  $\mu_0 = \nu_0 = 0$ , 即

$$g_x(\theta, \varphi) = \frac{C(K)}{2\pi} \exp(K \cos \theta) \sin \theta \quad (5)$$

式中  $0 \leq \theta < \pi; 0 \leq \varphi < 2\pi; K > 0; C(K) = \rho^2 l$ 。

设钢纤维样本的方向余弦为  $(l, m, n)$ , 则  $R_x = \sum l_i, R_y = \sum m_i, R_z = \sum n_i, R = (R_x^2 + R_y^2 + R_z^2)^{\frac{1}{2}}, \bar{R} = R/N, N$  为样本数。

根据  $\bar{R}$ , 查有关表格可得  $K$  值的极大估计值  $K$ , 据样本区研究的实际背景, 一般可设  $K = 0$ 。

在  $45^\circ$  到  $90^\circ$  之间对  $F_A(\theta)$  积分, 则可得到与喷射方向垂直方向的钢纤维的概率为  $\int_{45^\circ}^{90^\circ} F_A(\theta) d\theta$  和  $\int_0^{45^\circ} F_A(\theta) d\theta$ , 两者之间的比值为

$$\int_{45^\circ}^{90^\circ} F_A(\theta) d\theta / \int_0^{45^\circ} F_A(\theta) d\theta \approx 2.4 \quad (6)$$

式(6)表明, 约 70% 的钢纤维在冲击力的作用下, 沿与喷射方向垂直方向均匀分布。

文献[3]为研究钢纤维在混凝土中的分布, 进行了喷射式大板(400 mm × 400 mm × 130 mm) 试验, 钢纤维体积率 2%, 大板达到养护龄期(21 d) 后, 切割成 100 mm × 100 mm × 100 mm 立方体试件, 统计相互垂直两个表面上钢纤维的露头数量, 然后将立方体试件切片(100 mm × 100 mm × 20 mm), 统计每片表面纤维数量, 见表 1<sup>[3]</sup>。

表 1 立方体试件表面纤维分布

Table 1 The distribution of steel fiber on the cubic surface

纤维体 积掺量 /%	与喷射方向垂 直方向的 A 面 的纤维数	与喷射方向平 行方向的 B 面 的纤维数	A 面的纤维数 与 B 面的纤维 数之比
0.6	121	55	2.20
1.0	181	109	1.72
1.5	208	68	3.06
2.0	238	81	2.94
3.0	155	80	1.94

A 面纤维数与 B 面纤维数之比的平均值为 2.37。

表 1 的数值与式(6) 的计算结果基本吻合, 可以认为式(3) 为钢纤维的概率分布密度, 即钢纤维在喷射混凝土中服从球面上的 Fisher 分布。

### 3 钢纤维喷射混凝土力学特性分析

根据上述分析, 对钢纤维喷射混凝土进行力学特性分析时, 应充分考虑其分布特征。即如果分析其在垂直喷射方向上的力学特征, 则其体积密度应为

$$\rho_A = 2\rho \int_0^{45^\circ} F_A(\theta) d\theta / \int_0^{90^\circ} F_A(\theta) d\theta = 0.586\rho \quad (7)$$

如果分析其在平行方向的力学特征, 其体积密度为

$$\rho_B = 2\rho \int_{45^\circ}^{90^\circ} F_A(\theta) d\theta / \int_0^{90^\circ} F_A(\theta) d\theta = 1.4\rho \quad (8)$$

上述两式中,  $\rho_A$  为 A 点 A 面的钢纤维的体积密度;  $\rho_B$  为 A 点 B 面的钢纤维体积密度;  $\rho$  为钢纤维的平均体积密度。

由此可见钢纤维喷射混凝土的力学特征表现为明显的方向性, 大多数钢纤维的分布平行于巷道表面, 这样的分布有利于发挥钢纤维的增强效果。

文献[4] 提出了钢纤维混凝土抗压强度计算模式:

$$\sigma = \sigma_c(1 + 0.6\rho_a L_f / d_f) \quad (9)$$

式中  $\sigma$  为钢纤维混凝土抗压强度;  $\sigma_c$  为混凝土抗压强度;  $\rho_a$  为钢纤维体积密度;  $L_f$  为钢纤维长度;  $d_f$  为钢纤维的直径。

利用式(9) 进行平行于喷射方向的强度计算。取  $\sigma_c = 10$  MPa,  $\rho_a = 1.4\rho, \rho_l = 0.02, L_f = 0.02$  m,  $d_f = 0.001$  m, 计算得到  $\sigma$  为 13.36 MPa。

利用式(9) 进行垂直于喷射方向的强度计算。取  $\sigma_c = 10$  MPa,  $\rho_a = 0.585\rho, \rho_l = 0.02, L_f = 0.02$  m,  $d_f = 0.001$  m, 计算得到  $\sigma$  为 11.4 MPa。

为验证式(9), 在开滦矿务局荆各庄矿进行了现场实验, 所采用的参数与计算式相同。钢纤维采用切割的钢丝绳, 采用转子型混凝土喷射机, 向模具中喷射混凝土, 样护 28 d 后, 进行抗压实验, 共测 3 组, 得平行喷射方向抗压值为 13.4 MPa, 垂直喷射方向抗压强度为 12 MPa。实测结果与计算结果基本吻合。

### 4 结 语

通过钢纤维在喷射过程中的受力分析, 推论钢纤维在混凝土中服从 Fisher 分布, 计算得到约 70% 的钢纤维平行于巷道表面, 其长轴指向与巷道表面平行, 这样的分布特征有利于发挥钢纤维的增强效果, 实验结果与计算结果吻合较好。

#### 参考文献:

[1] 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.  
 [2] Mardia K V. Statistics of Direction Data[M]. London And New York: Academic Press, 1972. 228- 233.  
 [3] 李卷志. 钢纤维增强干喷混凝土试验研究报告[R]. 武汉: 武汉水利电力学院, 1985.  
 [4] 黄承逵, 赵国藩. 钢纤维混凝土设计强度的确定方法[A]. 全国第三届纤维水泥与纤维混凝土学术会议论文集[C]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1990. 23.