

# 喷射钢纤维混凝土的配合比

赵景海 程龙保

**摘要** 本文译编自日本土木学会制定的“喷射钢纤维混凝土施工纲要”，主要介绍喷射钢纤维混凝土的配合比及其性能。

**关键词** 喷射法 钢纤维混凝土 配合比

喷射钢纤维混凝土是利用压缩空气把一定配合比的混合料，通过喷射机的喷口以高速高压喷出，在被喷的隧道、边坡或建筑物表面上形成的钢纤维混凝土层。

确定喷射混凝土配合比时，应满足强度及和易性要求，并尽量减少钢纤维回弹率。

## 一、施工配合比和结构配合比的关系

通常在被喷射的混凝土中，颗粒越大的材料回弹率越大。与水泥相比，骨料容易回弹。因此，与喷出时的施工配合比相比，粘附在被喷面上的结构配合比中的水泥量增多。表1给出各材料回弹率的测定结果。

表1 喷射混凝土各材料的回弹量

砂率	喷射后 测试项目	水泥	水	砂	砾石
45	粘附率	90	70	55	35
	回弹率	10	30	45	65
55	粘附率	85	80	70	55
	回弹率	15	20	30	45
65	粘附率	90	80	65	55
	回弹率	10	20	35	45
75	粘附率	85	80	60	60
	回弹率	15	20	40	40
100	粘附率	90	80	75	—
	回弹率	10	20	25	—
试验结果	粘附率	90	80	65	55
总平均	回弹率	10	20	35	45

喷射钢纤维混凝土时，钢纤维比水泥及砂子容易回弹。因此，施工配合比和结构配合比中的钢纤维率是不同的。

## 二、喷射钢纤维混凝土配合比的确定

设计喷射钢纤维混凝土的配合比时，在满足混凝土质量要求的前提下，应尽量减少回弹，还必

须具有良好的施工性能。为此，必须正确确定以下各项：

- 1)粗骨料最大粒径；
- 2)砂率；
- 3)单位水泥用量；
- 4)水灰比的范围；
- 5)外加剂的种类及单位用量；
- 6)钢纤维率。

### ①粗骨料最大粒径

在喷射钢纤维混凝土配合比实例中，粗骨料最大粒径都遵照《喷射钢纤维混凝土施工纲要》中的规定，一般采用10~15mm。

### ②砂率

砂率对喷射混凝土的施工性能及混凝土的质量都有很大影响。喷射时钢纤维混凝土的砂率，应比不掺放钢纤维时取较大的数值，一般多为70%以上。

图1和图2为砂率以及其他配合比条件(没掺入钢纤维)同抗压强度、回弹率的关系。由图可见，砂率越大，回弹量越小；砂率增大到一定值时，抗压强度变化不大。

### ③单位水泥用量

单位水泥用量对混凝土质量、回弹、送料管的畅通等施工性能以及经济效率都有很大影响。恰当的单位水泥用量，因粗骨料最大粒径及砂率不

赵景海

程龙保 柳州欧维姆建筑机械有限公司 董事长 高级工程师

同而不同。如图1和图2所示,单位水泥用量越少,回弹量就越多,同时抗压强度也就越小。相反,单位水泥用量过多虽然回弹没有显著变化,但在施工时送料软管内的压送性能却变差了。干法施工时容易发生波动,难于获得水量大小适中的混凝土,其性质也不稳定。在湿法施工中,喷射机的种类限制水泥用量。有的机种在水泥用量过大时完全不能压送;相反,有的机种在水泥用量过少时会产生材料堵塞。因此,必须根据机械种类选定适中的单位水泥用量。

在通常使用的配合比中,采用干法施工的单位水泥用量,大多在以下范围:

- 混凝土中粗骨料最大粒径为15~25mm,砂率为50~75%时——350~400kg/m<sup>3</sup>;
- 砂浆——400~600kg/m<sup>3</sup>。

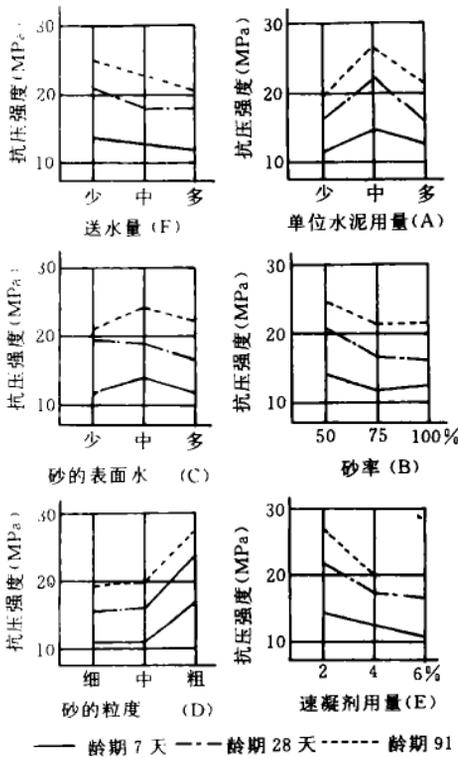


图1 各要素和抗压强度的关系

在湿法施工中,单位水泥用量依机械种类的差异而不同。用于喷射挖掘面的配合比,单位水泥用量要比上述值小些。

喷射钢纤维混凝土时,单位水泥用量大体可

以认为与普通混凝土相同。

④水灰比

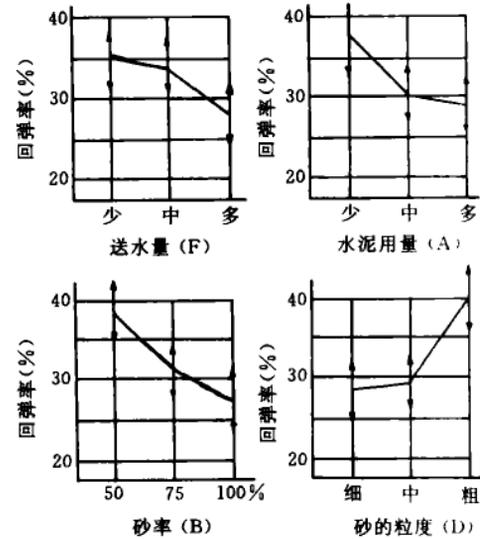


图2 各要素和回弹率的关系

在干法施工中,喷射工一边观察喷射面的状态,一边调用水量。根据过去的施工范例,一般W/C=40%~60%时可以进行施工。在隧道施工时W/C=50%左右居多。调节水量的一般标准是:喷射后的混凝土表面呈微湿、静止不动状态,发光的水很快就能干燥。如用水量多于这种状态,虽然回弹减少,但可能产生混凝土流淌现象,当横向喷射或向上喷射时,混凝土也可能会剥离掉。相反,如果用水量过少,虽然强度有可能增加,但粉尘和回弹量都要增多。当水以外的材料及配合比一定时,用这种一边观察喷射情况,一边调用水量的方法,可以保证水灰比处于一定范围内。在湿法施工中,如前所述,对于不同喷射机种,混凝土的最佳稠度不同,因而单位用水量也就不同。

⑤外加剂的种类及单位用量

喷射混凝土时最为主要的问题就是速凝剂的种类和用量。

使用速凝剂的目的是,为了在喷射后立即增进混凝土的强度。但有些速凝剂会使混凝土的长期强度降低,降低程度因速凝剂种类不同而有差别。因此速凝剂的选择要认真研究。

在干法施工中,可以使用减少水剂、引气剂、引气减水剂等,其影响可以大体认为与普通混凝土

土相同。

喷射钢纤维混凝土时,可以同上述一样进行分析。但是,应避免使用含有氯化物的速凝剂。

#### 四、喷射钢纤维混凝土硬化后的各种性能

喷射钢纤维混凝土硬化后的物理力学性能,反映了该施工方法所具有的特征(高速度的空气流携带喷射材料以高速度粘附在被喷物的表面),即喷射钢纤维混凝土是各向异性的。不论是干法施工还是湿法施工,都依据 W/C、速凝剂的种类和掺入率的不同,其性能也不相同。这里给出各种性能的标准值及有关资料。资料编号为干法施工时:D-1,D-2,……。湿法施工时:W-1,W-2,……。没有注明使用水泥种类处,使用的是普通硅酸盐水泥。

##### 1、抗弯强度

抗弯强度受钢纤维率及混凝土性质的影响,当钢纤维率大于 1%时,抗弯强度与钢纤维率成比例增长。见表 2 和图 3~7。

在比较大的面积上喷射较薄的钢纤维混凝土时,钢纤维大多分散在与喷射方向垂直的平面内。因此,荷载方向不同时,喷射钢纤维混凝土的强度也不同。一般情况下,弯曲试验大多让荷载方向与喷射方向一致,试件的轴线与喷射方向垂直。

##### 2、弯曲初度

喷射钢纤维混凝土的弯曲荷载—挠度曲线性状与浇灌钢纤维混凝土相同,受钢纤维率、钢纤维形状、尺寸以及水灰比的影响。喷射钢纤维混凝土所用钢纤维的公称长度,一般限定在 25~30mm,因此长度的影响比较小。见表 3 和图 8~11。

##### 3、抗压特性

抗压强度与浇灌钢纤维混凝土相同,通常重要反映混凝土基体的性质。抗压强度的试验结果见表 4、表 5 和图 12。

受压荷载—应变曲线受钢纤维率和 W/C 的影响较大,这与浇灌混凝土相同。喷射施工时,大多钢纤维分布在与喷射方向垂直的方向(参照“分散与取向”),所以受压荷载方向与喷射方向相同时钢纤维混凝土的延性,要比垂直时的延性好,其示例见图 13 和图 14。

##### 4、抗剪特性

钢纤维的掺入,使抗剪强度显著提高,表 6、

表 7、表 8 为抗剪强度试验结果示例。图 15 为剪应力—应变曲线。需要注意,试验方法对抗剪强度影响很大。图 16、图 17 为不同配合比钢纤维率对混凝土抗剪强度的影响。

##### 5、抗拉强度

抗拉强度与浇灌施工时相同,受混凝土基体的质量及钢纤维率的影响。抗拉强度随钢纤维率的增加而增加,表 9、表 10 给出了抗拉强度试验结果示例。

##### 6、钢纤维的分散与取向

喷射施工中的钢纤维,大部分取向在与喷射方向垂直的平面内(平行于被喷面)。

##### 7、耐久性

抵抗冻融的能力与浇灌施工时相同,随钢纤维率成比例增大。中性化深度不受钢纤维率的影响,但比浇灌施工时大,其试验结果示于图 18、图 19。

表 2 抗弯强度试验结果(D-1)(单位:MPa)

试件 No	荷载方向(A)		荷载方向(B)		(B)/(A)
	$\sigma_{b1}$	$\sigma_b$	$\sigma_{b1}$	$\sigma_b$	
1	3.28		3.04		
		3.53		3.58	1.01
2	3.78		4.11		

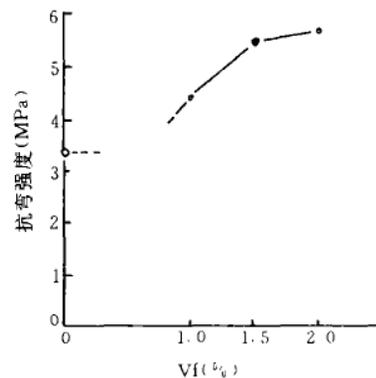


图 3 纤维率和抗弯强度(D-2)

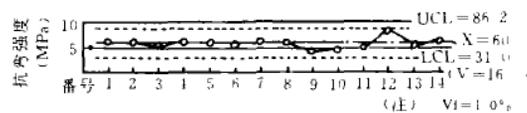


图 4 抗弯强度试验结果(D-5)

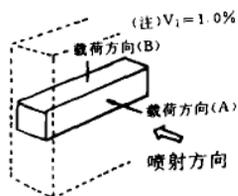


图5 试件的切取和荷载方向(D-1)

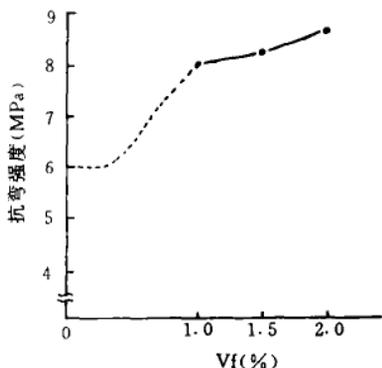


图6 纤维率和抗弯强度(W-3;超早强水泥)

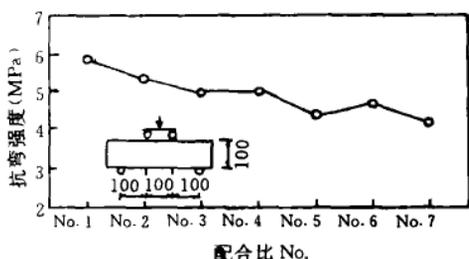


图7 抗弯试验结果(W-1)( $V_1=1.5\%$ , 但No.7的 $V_1=0\%$ )

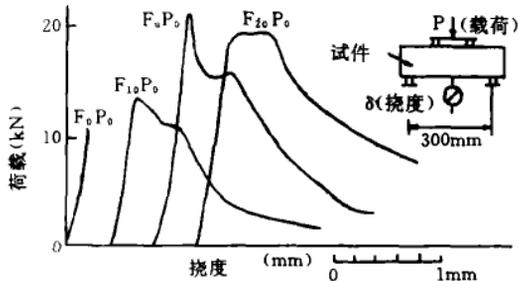


图8 钢纤维率和弯曲荷载—挠度曲线(龄期28天)(D-2)

表3 抗弯初度(D-1)(单位:MPa)

试件 No	荷载方向(A)		荷载方向(B)	
	$T_B$	$T_B$	$T_B$	$T_B$
1	0.371	0.312	0.564	0.407
2	0.260		0.250	

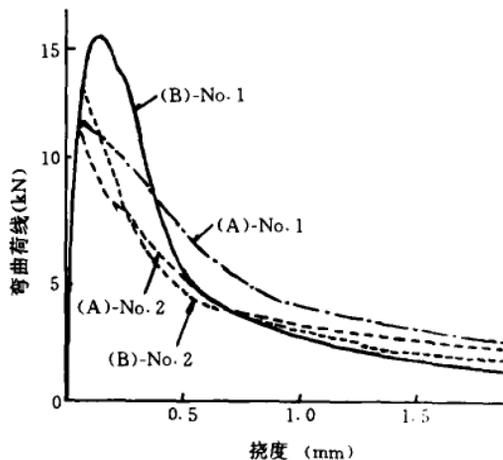


图9 荷载方向和弯曲荷载—挠度曲线(1-1) [(A)、(B)为荷载方向]

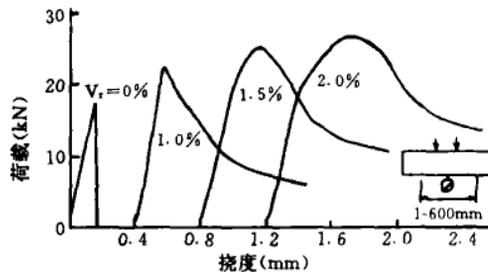


图10 钢纤维率和弯曲荷载—挠度曲线 (C型喷射机,A种钢纤维,龄期28天,使用超早强水泥)(W-3)

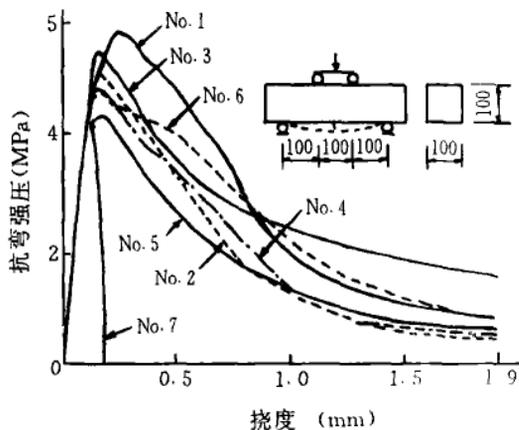


图11 抗弯强度—挠度曲线(W-1)

表4 抗压和抗拉试验结果(D-1)(单位:MPa)

工艺	试件 No.	抗压强度		抗拉强度		$\sigma_c/\sigma_t$
		$\sigma_{c1}$	$\sigma_c$	$\sigma_{t1}$	$\sigma_t$	
干法	1	27.6		2.75		10.1
	2	22.5	26.7	2.82	2.65	
	3	30.0		2.38		

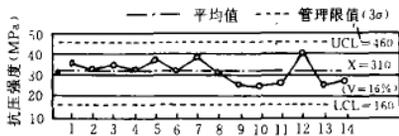


图12 强度特性的管理图(D-1)

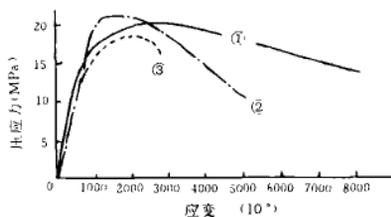


图13 应力—应变曲线(D-5)

图中:①喷射钢纤维混凝土(荷载方向与喷射方向相同),②喷射钢纤维混凝土(荷载方向与喷射方向垂直),③普通混凝土(未掺钢纤维)。

表5 抗压强度试验结果(W-2)(单位:MPa)

工艺	试件 No.	$\sigma_{c1}$	$\sigma_c$	备注
湿	1-B-1	37.8	36.3	试件中孔隙较多
	1-B-2	34.7		
法	2-B-1	45.9	46.1	几乎没有孔隙
	2-B-2	45.0		
	3-B	47.3		

注:使用早强水泥

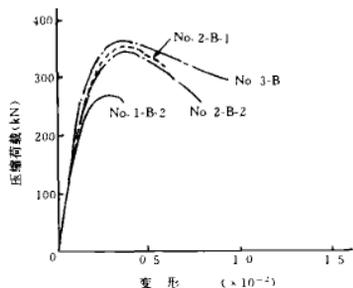


图14 压缩荷载—变形曲线(W-2)(使用早强水泥)

表6 强度平均值(D-3)(单位:MPa)

工艺	试件	抗压强度	抗弯强度	抗剪强度
干法	$\sigma_{28}$ (大板试件)	19.0	4.3	4.0
	$\sigma_{32}$ (现场取件)	20.6	—	—

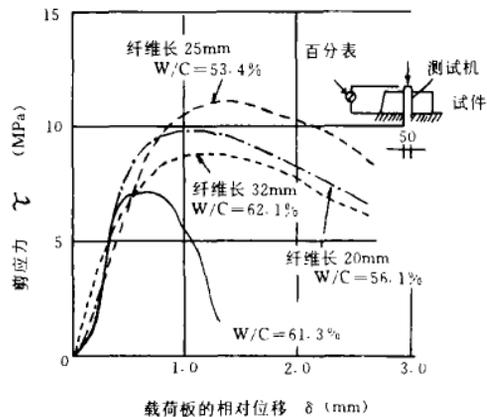


图15 剪应力—加荷载板相对位移关系(D-4) (双面剪切)

表7 抗剪强度试验结果(D-1)(单位:MPa)

荷载方向	试件 No.	$\tau_1$	$\tau$
喷射方向	1	7.90	8.03
	2	8.16	
垂直喷射方向	3	8.15	8.44
	4	8.72	

表8 抗剪强度试验结果(W-2)(单位:MPa)

工艺	试件 No.	荷载方向(A)		荷载方向(B)		(B)/(A)
		$\tau_1$	$\tau$	$\tau_1$	$\tau$	
湿法	1	4.20	4.27	5.58	5.56	1.3
	2	4.33	4.27	5.54	5.56	

注:荷载方向同表4.1,使用早强水泥

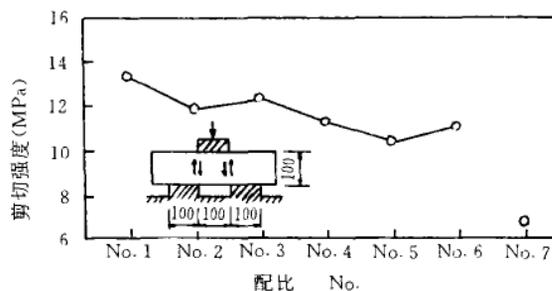


图16 剪切试验结果(W-1)

( $V_f=1.5\%$ , No. 7的  $V_f=0$ ;  
平均抗剪强度为11.7MPa)

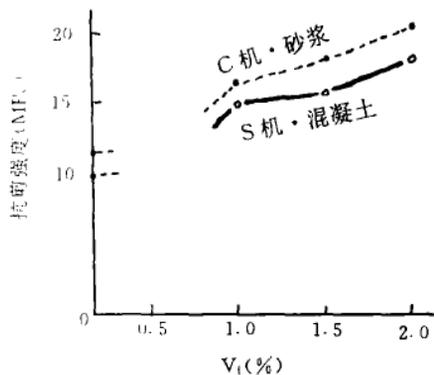


图 17 钢纤维率和抗剪强度(W-3)

表 9 抗拉强度试验结果(D-1)(单位:MPa)

工艺	试件					$\sigma_t/\sigma_c$
		$\sigma_{t1}$	$\sigma_c$	$\sigma_{t1}$	$\sigma_t$	
干法	1	27.6	26.7	2.75	2.65	10.1
	2	22.5		2.82		
	3	30.0		2.38		

表 10 抗拉强度试验结果(W-2)(单位:MPa)

工艺	试件轴 线方向	试件 No.	$\sigma_{t1}$	$\sigma_t$	(B)/(A)
湿 法	喷射 方向 (A)	1-A	3.86	3.95	0.68
		2-A	4.20		
		3-A	3.80		
	与喷射向 方垂直的 水平方向 (B)	1-B	2.30*	2.69	
		2-B	2.98		
		3-B-1	2.43		
		3-B-2	2.65		

\*取平均值时将孔隙多的该项去掉,使用早强水泥。

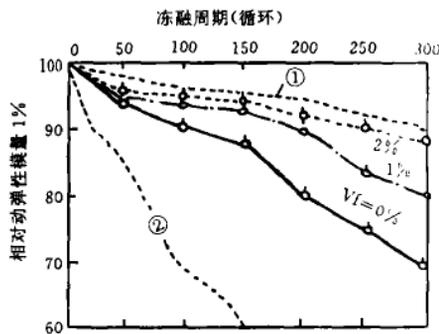


图 18 喷射钢纤维混凝土的冻融试验结果(W-5)

(使用 A 种钢纤维, C 型喷射机, 采用超早强水泥。

图中: ①为引气混凝土, 含气率 5%;  
②为普通混凝土, 含气率 1%)

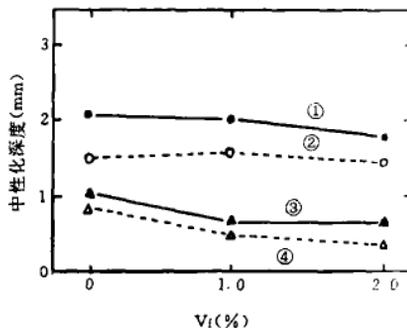


图 19 喷射钢纤维混凝土的中性化深度(W-3)

(龄期为一年, 使用 A 种钢纤维, C 型喷射机, 采用超早强水泥。图中①为喷射钢纤维混凝土一室内; ②为喷射钢纤维混凝土一室外; ③为浇灌钢纤维混凝土一室内; ④为浇灌钢纤维混凝土一室外)

HVM 信息

## HVM 预应力新技术交流活动

2000 年下半年, 柳州欧维姆建筑机械有限公司组织技术交流小组分赴成都、西安、重庆、贵阳等西部开发重镇和天津、上海、深圳、福建等沿海地区及长春、哈尔滨等地市, 向有关科研、设计、院校及施工单位介绍预应力新技术和 HVM 新成果, 并进行技术服务与信息交流。柳州欧维姆公司

在交流预应力锚固和真空辅助灌浆技术外, 还邀请了华北水利水电学院李树瑶教授、同济大学陆宗林教授就环锚技术及“夹片式锚具的发展与应用技术”作了专题讲座, 受到与会人员的欢迎与好评。

(王守海)

更  
正

《海威姆预应力技术》2000 年第 3 期第 41 页照片说明中“喷粉在机”应为“喷粉桩机”, 特此更正, 并对作者及读者致歉。