

⑦

26-35

聚丙烯纤维增强高含量粉煤灰 喷射混凝土的性能

Dudley R. Morgan 等著 李凤兰 译

Morg., DR

TU 528.53

摘要: 本文报道为评价聚丙烯纤维增强高含量粉煤灰喷射混凝土的性能所做试验研究结果。研究分两阶段完成: I 阶段研究 12 种粉煤灰含量和聚丙烯纤维掺量(含纤量)变化的混凝土,测定其抗压强度、抗弯强度和弯曲韧性,据此选出 II 阶段研究的 6 种喷射混凝土,其中胶结材料用量为 400 和 450kg/m³,含纤量为 0.3 和 6kg/m³。喷射大小各 12 块试验试板,大者用于约束收缩试验,小者用于钻取圆柱体芯样和切割棱柱体进行喷射混凝土的抗压强度、抗弯强度、弯曲韧性及冻融耐久性试验。

试验结果表明,聚丙烯纤维增强高含量粉煤灰喷射混凝土完全可用常规的湿拌喷射混凝土设备施工,但要求其最小胶结材料用量和用水量分别为 420kg/m³ 和 150kg/m³。当含纤量为 4~6kg/m³ 时弯曲韧性好,并且具有良好的强度发展特征和优异的冻融耐久性。研究成果可在诸如覆盖或封闭大面积易剥蚀的裸露岩石和采矿废料堆等方面得到广泛应用。

关键词: 粉煤灰; 冻融耐久性; 聚丙烯纤维; 喷射混凝土

在加拿大的一些地区,大面积的岩床由于建造活动而暴露出来,某些类型的岩石,如黄铁矿板岩和某些泥石岩页岩,由于大气、表面水(雨水或融雪)浸入或冰冻(如道路和机场建造中的开挖和回填)作用等原因,很易于剥蚀。此外,许多采矿过程的副产品(大量的尾矿和废石),无论是可利用的还是废弃的,也是易于解体的。

一些类型岩石的物理剥蚀,与其它的化学和地质活动相结合,可导致酸雨和其它侵蚀性物质的渗漏,它们有可能伴有重金属和其它潜在的毒性元素,如不加以控制,这些物质一旦浸入区域表面排水和地下水系统,就会导致严重的污染。作者相信,本文所述的聚丙烯纤维增强高含量粉煤灰喷射混凝土体系,具有提供技术可行效益明显的修补体系的潜力。该研究是对与其相似的在渥太华 CANMET 完成的试验室研究的补充。

1 研究意义

本研究的目的是开发一种可用于覆盖或封闭大面积裸露岩石的韧性良好的喷射混凝土体系。该混凝土的重要特性是柔韧且开裂的可能性很小,其经济效果应与其它的覆盖和封闭体系可比。根据以往的研究,该目标可以通过在高含量粉煤灰喷射混凝土体系内掺入高比率的原纤化聚丙烯纤维达到。本研究证实了该体系的可行性。

2 研究范围

2.1 I 阶段

在实验室内灌注 12 种模拟喷射混凝土拌和物。粉煤灰含量为胶结材料总重量的 0、60% 和 75%，额定含纤量为 0、2、4 和 6kg/m³，每种拌和物制成试件后，分别测定其 7、28 和 56 天龄期的抗压强度，28 天的抗弯强度和弯曲韧性，I 阶段试验室内研究用于筛选 II 阶段研究采用的喷射混凝土拌和物。

2.2 II 阶段

在 I 地上喷射 6 种混凝土拌和物，其胶结材料用量为 420kg/m³ 和 480kg/m³，含纤量为 0、3 和 6kg/m³ 喷射大型试验嵌板(1×3m 厚 40mm)和小型试验嵌板(600×600×125mm)各 12 块。

大型试验嵌板用于约束收缩试验。小型试验嵌板用于钻取圆柱体芯样和切割棱柱体测定喷射混凝土的抗压强度、抗弯强度、弯曲韧性和冻融耐久性。

表 2 骨料的级配

筛孔尺寸	每级筛的通过率(重量比)% #2 级配*
19.0mm	—
12.5mm	—
9.5mm	100.0
4.75mm	77.5
2.36mm	60.0
1.18mm	45.0
600μm	27.5
300μm	14.0
150μm	6.0

注:ACI 506R-85 规定

3 I 阶段的研究

3.1 材料

ASTM 波特兰 I 型(CSA10 型)

表 1 水泥和粉煤灰的物理性能和化学分析

	I 型波特兰水泥	F 级粉煤灰
物理性能:		
细度:45μm 孔湿筛		
通过率(%)	94.4	84.0
勃氏比表面积(cm ² /g)	3935	3510
维长针凝结时间(min)		
初 凝	155	—
终 凝	305	—
蒸压膨胀率(%)	0.13	—
抗压强度		
(50mm 立方体试块 MPa)		
3 天	25.0	—
7 天	32.6	—
火山灰活性指数		
28 天(%)	—	97
化学分析(%)		
SiO ₂	21.09	42.20
CaO	62.32	1.63
Al ₂ O ₃	4.81	20.7
Fe ₂ O ₃	2.33	24.8
MgO	3.06	0.97
SO ₃	3.01	0.85
Na(Na ₂ O 等效)	0.88	0.59
K ₂ O	—	—
烧失量	1.44	2.66
不溶残余物	0.36	—
矿物组成(鲍格法计算):		
C ₃ S	49	—
C ₂ S	23	—
C ₃ A	8.8	—
C ₄ AF	7.1	—

水泥和在 Nova Scotia 工厂生产的低钡 (ASTM F 级) 粉煤灰, 其物理性能和化学分析均列入表 1。

排序原纤化聚丙烯纤维, 长度为 38mm。

粗骨料为最大粒径 10mm 的河卵石, 细骨料为自然砂, 骨料级配按 ACI506-85 规定 #2 级配要求, 列入表 2。

萘基超塑剂 (高效减水剂), 含氯量很小。

松香皂热塑料树脂基引气剂。

3.2 配合比

混凝土配合比列入表 3, 其中骨料为表面干燥饱和状态。基体混凝土拌和物分如下三组:

a) A 组——不掺粉煤灰的纯波特兰水泥对比拌和物, 水泥额定用量 $400\text{kg}/\text{m}^3$ 。

b) B 组——粉煤灰和水泥重量分别为胶结材料总重量的 60% 和 40%, 胶结材料额定用量 $400\text{kg}/\text{m}^3$ 。

c) C 组——粉煤灰和水泥重量分别为胶结材料总重量的 75% 和 25%, 胶结材料额定用量 $400\text{kg}/\text{m}^3$ 。

表 3 I 阶段研究的新拌混凝土配合比及其性能

	对比混凝土 (无粉煤灰)				60% 粉煤灰				75% 粉煤灰			
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄
纤维掺量 kg/m^3	—	2.00	4.00	3.00	—	2.00	4.05	5.94	—	2.00	3.98	6.11
CSA 10 型水泥 ^a kg/m^3	393	391	397	397	160	161	161	157	101	101	99	102
粉煤灰 (FA) kg/m^3	—	—	—	—	240	241	241	236	302	304	297	305
10、5mm 粗骨料 kg/m^3	423	420	427	427	410	413	412	403	412	415	406	417
砂 kg/m^3	1268	1260	1280	1281	1250	1258	1257	1230	1257	1266	1218	1257
水 kg/m^3	157	156	163	163	150	151	151	162	143	135	166	149
超塑剂 L/m^3	3.96	4.63	3.0	7.0	3.30	3.76	4.90	7.29	3.75	5.08	6.11	8.15
$W/(C+FA)^*$	0.40	0.40	0.41	0.41	0.38	0.38	0.38	0.41	0.36	0.33	0.42	0.37
纤维掺入前坍落度, mm	70	75	85	90	110	110	110	85	75	70	95	130
纤维掺入后坍落度, mm	—	70	40	70	—	80	100	95	—	85	135	90
含气量 (%)	8.0	8.3	5.9	6.0	6.4	5.6	5.3	5.5	5.8	5.7	4.8	3.8
比重 kg/m^3	2235	2225	2250	2260	2250	2275	2270	2250	2275	2275	2270	2330

注: 超塑剂按控制坍落度所需加入

译注: ☆ CSA 10 型水泥即表 1 列 I 型波特兰水泥; * 原文无 (), 恐未漏刊。

拌和物均在鼓形旋转搅拌机中拌和至适合用湿拌喷射混凝土工艺灌注, 开始时打算将聚丙烯纤维以 2、4 和 $6\text{kg}/\text{m}^3$ 的掺量掺入上述三组基体拌和物, 这在粉煤灰拌和物中做到了, 但是发现 $4\text{kg}/\text{m}^3$ 为纯波特兰水泥对比拌和物的最大实用纤维掺量, 掺入更多纤维的拌和物产生了过多的析水, 分层和纤维起团。因此, 在 A 组中, 代之以纤维掺量为 $3\text{kg}/\text{m}^3$ 的纯

波特兰水泥拌和物。

所有基体拌和物均将大约 $4\text{L}/\text{m}^3$ 超塑剂加入 $3/4$ 的拌和水中制备,剩余的拌和水控制坍落度在 $90 \pm 20\text{mm}$ 范围内。聚丙烯纤维以前述掺量加入各种拌和物,并加入足够的超塑剂以获得喷射所需的工作度。在流态混凝土的性能测定前搅拌 5 分钟。

3.3 试验内容

新拌混凝土的性能(温度、坍落度、比重和含气量)列入表 3。

成对浇注 $100 \times 100\text{mm}$ 圆柱体测试混凝土在 7、28 和 56 天龄期的抗压强度。在钢模内浇注 $75 \times 75 \times 355\text{mm}$ 棱柱体,每组三个,按 ASTM C 1018 规定测试 28 天龄期的抗弯强度和弯曲韧性。试剂脱模前在 23°C 试验室内放置 24 小时,脱模后放入 23°C 相对湿度 98% 的养护室内养护至试验时。

抗压强度、抗弯强度和弯曲韧性指数试验值列入表 4。

表 4 1 阶段研究 A、B、C 三组混凝土的
抗压强度、抗弯强度、弯曲韧性指数和残余强度

	A 组				B 组				C 组			
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄
抗压强度, MPa												
7 天	36.1	37.9	37.4	35.4	10.7	9.8	10.4	10.9	5.3	5.1	3.7	7.1
28 天	45.0	46.9	48.3	48.3	21.0	20.6	21.5	21.4	12.1	12.2	8.8	14.5
56 天	50.1	50.0	54.4	50.4	25.8	27.2	27.2	26.9	17.3	17.6	12.5	20.5
抗弯强度, MPa												
28 天	5.6	6.1	5.2	5.4	2.8	2.7	3.0	2.8	1.9	1.8	1.4	2.0
28 天的弯曲韧性指数												
I ₅	—	2.3	3.2	3.0	—	2.6	3.5	3.7	—	2.6	3.7	4.6
I ₁₅	—	3.3	5.8	5.0	—	3.9	6.7	7.4	—	4.0	7.1	9.1
I ₂₀	—	5.1	10.5	8.4	—	6.4	12.6	14.0	—	6.9	13.1	15.6
残余强度系数												
R _{5 10} *	—	20	52	40	—	27	64	74	—	28	67	90
R _{10 20} *	—	18	47	34	—	25	58	67	—	29	60	65

注: $R_{5 10} = 20(I_{10} - I_5)$ $R_{10 20} = 10(I_{20} - I_{10})$

3.4 成果分析

a) 新拌混凝土的性能: B 组拌和物呈现出最理想的性能, 仅有很少的析水, 分层或纤维起团现象。相反, A 组拌合物析水严重, 并且在含纤量 $4\text{kg}/\text{m}^3$ 时出现分层和纤维起团不适于喷射。C 组拌和物性能介于 A、B 两组之间, 即其工作性能和粘聚性均不如 B 组, 但好于 A 组, C 组拌和物内掺入 $6\text{kg}/\text{m}^3$ 纤维是可能的, 但却不适于喷射。

b) 硬化混凝土的性能: 若每组中的的拌和物用水量和含气量完全相同, 可以预料其抗压和抗弯强度是相近的, 事实也是如此, 每组拌和物的抗压和抗弯强度的变化范围很小。

正如所料, 混凝土在龄期 7、28 天和 56 天的抗压强度 A 组高于 B 组, B 组高于 C 组。例如,

不掺纤维粉煤灰含量0、60和75%的拌和物28天抗压强度分别为15.0、21.0和12.1MPa,抗弯强度相应地分别为5.6、2.8和1.9MPa。

所有纤维增强拌和物均按 ASTM C 1018规定测试28天的弯曲韧性。所有含纤量超过4kg/m³的拌和物(Mix A3除外),其韧性指数均符合对应用于隧道、采矿和边坡稳定的纤维增强喷射混凝土一般规定的标准,即 $I_5 \geq 3.5$ 和 $I_{10} \geq 5.0$ *。据此建议聚丙烯纤维增强高含量粉煤灰喷射混凝土的实用纤维掺量应至少为4kg/m³。

3.5 结论

试验室内研究表明,60%粉煤灰、胶结材料总用量至少400kg/m³、含纤量4kg/m³的混凝土拌和物适合于喷射施工,具有良好的流变性能,析水分层和纤维起团现象很少。硬化后混凝土棱柱体的弯曲韧性指数符合 ASTM C 1018对边坡稳定的一般规定,即 $I_5 \geq 3.5$ 和 $I_{10} \geq 5.0$ 。

4 II 阶段的研究

4.1 试验内容

表5 II 阶段研究的新拌混凝土配合比及其性能

	胶结材料名义含量,420kg/m ³			胶结材料名义含量,480kg/m ³		
	Mix u	Mix v	Mix w	Mix x	Mix y	Mix z
纤维掺量 kg/m ³	0	3.1	6.4	0	3.3	6.5
CSA10型水泥 kg/m ³	161	157	158	172	174	167
粉煤灰(FA) kg/m ³	269	261	264	312	313	303
粗骨料 kg/m ³	541	520	520	507	500	489
砂 kg/m ³	1267	1220	1223	1198	1185	1159
水 kg/m ³	108	152	149	147	142	158
超塑剂 L/m ³	9.5	5.2	4.2	4.3	4.4	4.3
W/(C+FA)	0.25	0.36	0.35	0.30	0.29	0.34
纤维掺入前坍落度 mm	220	60	135	120	115	230
纤维掺入后坍落度 mm	—	45	40	—	55	125
纤维掺入前含气量 (%)	9.3	10.7	12.6	9.7	8.8	12.5
纤维掺入后含气量 (%)	—	10.0	9.6	—	10.8	13.7
喷射施工后含气量(%)	5.2	3.9	3.6	3.6	4.5	4.5
环境温度 ℃	8	5	3	7	—	10
喷射温度 ℃	12	13	12	14	14	13

* 注:弯曲韧性指数 I_5 和 I_{10} 分别为对应于3倍和5.5倍 开裂挠度时荷载-挠度曲线下面积与对应于开裂挠度时荷载-挠度曲线下面积的比值。

Ⅱ阶段研究着重于积累用常规喷射施工设备在工地试验聚丙烯纤维增强高含量粉煤灰喷射混凝土性能的资料。

研究用材料同Ⅰ阶段,配合比列入表7。材料按重量配合,无水干燥骨料,用1600kg 散装袋供料。对每种拌和物,在运输搅拌机内加料两袋。然后加入需要的水、超塑剂和引气剂。当拌和物搅拌至要求的稠度时,将聚丙烯纤维直接加入运输搅拌机,新拌混凝土进入喷浆泵并经内径50mm的喷头喷射。

新拌混凝土的性能列入表5。

大型试验嵌板——大型试验嵌板(1×3m)通过向1×3m 钢模内的板基上喷射约40mm厚混凝土制成。每种拌和物各喷制2块。第一块板代表无粘结情况,基底为碎岩片(最大尺寸<20mm)并用板式振捣器压实用抹刀刮平。第二块板代表完全粘结情况,每块嵌板的长边端被一插入固定端的钢框架约束以免移动,另两边自由,从而产生单向收缩应力。

表8 Ⅱ阶段研究混凝土的抗压强度、抗弯强度、弯曲韧性指数和残余强度

	Mix u	Mix v	Mix w	Mix x	Mix y	Mix z
75mm 直径钻孔芯样的抗压强度 MPa						
7天	17.7	7.0	6.1	10.2	8.8	7.6
28天	37.9	19.0	18.2	23.4	22.1	19.2
56天	44.8	21.3	22.6	27.3	25.6	23.6
91天	53.2	26.0	25.6	34.0	31.9	29.9
150×300mm 圆柱体的抗压强度 MPa						
7天	15.9	7.3	7.9	9.8	9.4	6.9
28天	32.2	17.1	16.9	24.3	20.2	15.8
56天	37.5	20.8	20.5	23.5	24.8	19.3
91天	46.0	21.5	21.1	25.2	26.9	23.5
抗弯强度 MPa						
28天	4.8	2.9	2.7	3.2	3.2	3.1
28天的弯曲韧性指数						
I ₅	—	2.8	3.4	—	3.4	3.7
I ₁₀	—	4.9	6.1	—	5.9	7.2
I ₂₀	—	8.2	10.6	—	10.2	12.8
残余强度系数						
R _{5,10}	—	41	55	—	50	70
R _{10,20}	—	33	45	—	43	56
煮沸吸收率, %	3.4	6.3	7.1	5.2	5.8	6.7
可渗透孔体积, %	7.8	13.7	15.1	11.7	12.7	14.5

嵌板在喷射后前7天内用防水帆布遮盖防雨,之后便暴露在温哥华室外环境中。

小型试验嵌板——每种拌和物喷射两块标准试验嵌板(600×600×125mm,侧边倾角45°),嵌板直接在木模内喷射并覆盖聚乙烯塑料在室外冷环境(3~10℃)中放置6天,然后在23℃雾室内养护至试验。

此外,通过直接向圆柱模内喷射混凝土制作150×300mm圆柱体试件,每种拌和物三个。

a)抗压强度试验,在6和24天龄期从每块嵌板上分别钻取2个直径75×100mm圆柱体芯样测定7和28天的抗压强度,芯样按ASTM C 42-87(CSA 23.2-14C)规定修理,覆盖和试验。芯样圆柱体和模制圆柱体的抗压强度平均试验值见表6和图1。

b)抗弯强度、韧性指数和残余强度试验在工地养护6天再经过22天潮湿养护(23℃),在每块嵌板上锯下三个75×75×335mm棱柱体,按ASTM C 1018规定测定其抗弯强度和 I_5 、 I_{10} 、 I_{20} 韧性指数值。试验采用伺服控制式试验机,挠度用两个平均线性变化微差传感器测量,试验平均值见表8、9,典型的荷载-挠度实测曲线见图3、4。

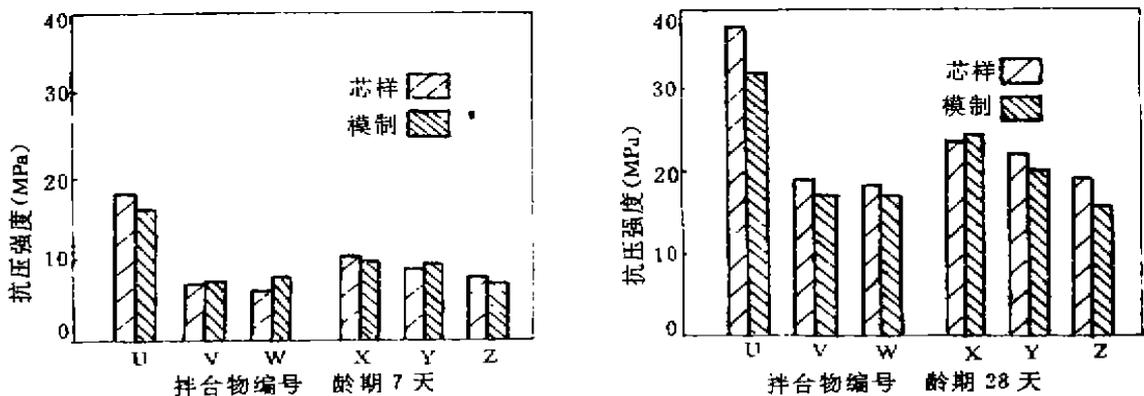


图1 75mm 芯样圆柱体和150×300mm 模制圆柱体抗压强度的比较

c)煮沸吸收和可透孔体积试验,6种拌和物的煮沸吸收,可渗透孔体积和相对松散容重按ASTM C642规定测试,弯曲试件在28天试验后,从两端切割三个75mm立方体试块,重新放入雾室直至35天试验时取出,试验平均值见表10。

d)孔系统参数至24天龄期时从标准嵌板上钻取直径150mm的圆柱体芯样,按照ASTM C457规定,测试其气孔间隔系数含气量及比表面积,结果见表7。

e)冻融试验,用于冻融耐久性试验的嵌板在工地养护6天,再在雾室潮湿养护16天、23天时,在每块嵌板上锯下3个75×90×405mm棱柱体,棱柱体在23℃水中养护至28天进行冻融试验,试验按ASTM C 666规定的水中冻融方法A进行,结果见表7。

4.2 成果分析

对比混凝土(波特兰水泥 Mix u 无纤维)拌和物难于喷射施工,尽管具有流动稠度(坍落度220mm)。掺纤维拌和物具有合适的泵送和喷射性能。然而,含纤量较大的喷射混凝土拌和物有轻微的分层现象,在大型试验嵌板表面产生一些“出石”现象,同时因表面纤维多而使抹光困难。但由于多数喷射混凝土工程保留喷射表面自然状况无需抹光,因而这不是关心重

点。本研究为了便于检查裂缝,对板表面做了抹光。

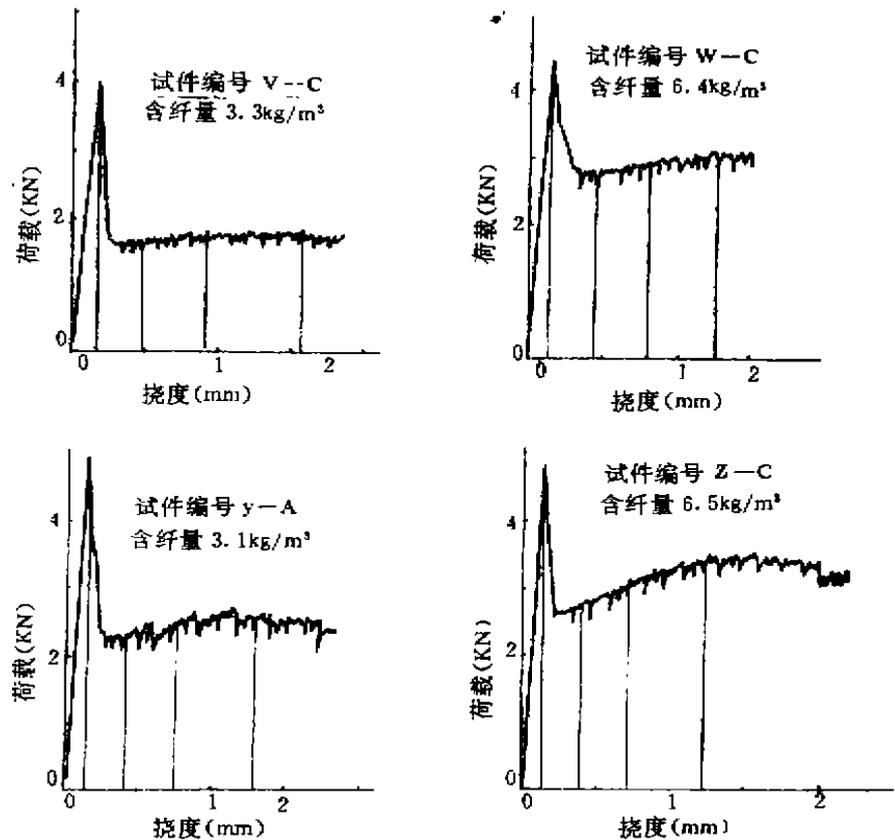


图2 典型的荷载-挠度实验曲线

- 1) 试验按照 ASTM C 1018-85 规定“纤维增强喷射混凝土抗弯强度试验方法”
- 2) 试件尺寸: $75 \times 75 \times 355 \text{mm}$ 龄期 28 天

拌和物在纤维掺入前含气量在 8.8~12.6%, 喷入气压表基底时的含气量在 3.6~5.2% 变化, 显然在泵送和喷射过程中相当部分的气体损失了, 这是生产含气湿拌喷射混凝土时特有的。

抗压强度——抗压强度和水灰比存在良好的关系, 即水灰比最低的拌合物, 其抗压强度最高。试验结果也表明圆柱体芯样的模制圆柱体抗压强度间存在合理的关系(图 1、2), 28 天的模制圆柱体较圆柱体芯样抗压强度略低, 但 7 天时则不明显。

同批模制圆柱体之间也显示出良好的复验性, 当大约 10% 的试件因孔大而剔除后, (这种有缺陷试件很易于鉴别出来不再进行试验)。确信这些孔是由于喷射时喷嘴相对于圆柱模的角度轻微偏离竖直造成的。一般来说, 优先选择从试验嵌板钻取试验芯样而不选择向圆柱模内喷射制作试件。

抗弯强度和弯曲韧性指数——对比混凝土 (Mix u 无纤维) 28 天时的抗弯强度最高, 其值为 4.8 MPa, 其它拌合物 (含或不含纤维) 的抗弯强度在 3.0 MPa 左右。

表7 II阶段研究混凝土的气孔参数和冻融耐久性试验数据

试验方法			Mix v	Mix w	Mix x	Mix y	Mix z
CAN/CSA A23.3-4C	含气量(%)	喷前	10.0	9.6	9.7	10.8	13.7
		喷后	3.9	3.6	3.6	4.5	4.5
		含气量(%)	3.8	4.0	4.5	5.0	3.8
ASTM C 457	喷射混凝土硬化后	间隔系数 mm	0.196	0.170	0.143	0.242	0.132
		比表面 1/mm	28	32	26	21	45
ASTM	冻融循环	耐久性系数	95	94	98	96	92
C 666 方法 A	300次后	重量损失(%)	3.0	1.6	1.9	2.5	2.0
ASTM	煮沸吸收率	%	6.3	7.1	5.2	5.8	6.7
C 642	可渗透孔体积	%	13.7	15.1	11.7	12.7	14.5

弯曲韧性指数(I_5 、 I_{10} 和 I_{20})按 ASTM C 1018规定以实测荷载-挠度曲线计算。用于隧道、采矿、边坡稳定和修补工程的纤维喷射混凝土的弯曲韧性指数一般规定的 $I_5 \geq 3.5$ 和 $I_{10} \geq 5.0$,含纤量 6.5kg/m^3 和胶结材料用量 470kg/m^3 的 Mix z 棱柱体,是唯一符合上述规定的拌和物。

Mix v(含纤量 3.1kg/m^3 、胶结材料用量 420kg/m^3)不符合上述任一标准,其它两种含纤拌和物的棱柱体试验符合 I_{10} 限值,接近于 I_5 限值。

煮沸吸收和可渗透孔——试验表明,几乎所有的喷射混凝土的密实性良好(表10),水灰比与煮沸吸收和可渗透孔体积存在良好的关系,水灰比最低的拌和物(抗压和抗弯强度最大)显示出最低的煮沸吸收和可渗透孔体积,按照评定喷射混凝土这些性能的一般标准,试验数据表明本研究喷射混凝土达到了“优异”或“良好”水平。

孔系统参数——除一个外,硬化混凝土的间隔系数L均低于 CAN/CSA-A23.1对耐久混凝土的建议值 0.23mm 。比表面范围 $21 \sim 45 \text{ 1/mm}$ 对所有拌和物都是优异的。

冻融耐久性——按 ASTM C 666方法 A 进行300次循环,测定动态弹性模量和重量损失,耐久性系数由实测动态弹性模量计算得到,其值在 $92 \sim 98$ 之间,表明喷射混凝土具有出色的耐久性(表10)。

约束收缩试验——对用于约束试验的12块大型试验嵌板,连续观测3个月,在此期间未发现任何嵌板上产生裂纹。但在7个月时,在一块有粘结基底嵌板和两块无粘结基底嵌板上发现了一些间断裂纹,裂纹明显的嵌板为对比嵌板 u(有粘结基底,无纤维)和嵌板 v、w(无粘结基底,含纤维)。由于资料局限,还不能确切解释裂缝形状的原因,对此需进一步深入研究。

5 结束语

a)本研究结果证明了使用常规的运输搅拌机和湿搅喷射混凝土设备在工程上配料、拌和、泵送及喷射聚丙烯纤维增强高含量粉煤灰喷射混凝土是可行的,拌和物最小用水量约为

150

kg/m³。

b) I 阶段工程研究的喷射混凝土拌和物具有良好的强度发展特性和出色的冻融耐久性,胶结材料额定用量 480kg/m³和含纤量 6.5kg/m³的拌和物具有良好的弯曲韧性指数。

c) 一些含或不含纤维的大型试验嵌板在温哥华环境中放置 7 个月出现了间断的约束收缩裂纹,这一观察的重要性尚需进一步研究。

d) 所研究的喷射混凝土拌和物可用于覆盖易于损坏的裸露岩石,但是,对此类应用可能需要提出弯曲韧性指数的新标准,建议进行大量的工程试验,以便对这种喷射混凝土体系的使用性能进一步加以评价。

译自“ACI Materials Journal”, March-April, 1992, 169~177

胡曙光 校