

大秦铁路的混凝土施工新技术

中国铁道建筑总公司 杜永碧

节约水泥是国家“七五”期间的一项重要工作。为了贯彻国家计委等四部委下发的《关于认真做好推广应用减水剂和粉煤灰节约水泥的通知》和铁道部《铁路工程建设“七五”节约水泥工作要点》，在大秦线施工的十六、十七局，十三局三处、二十局三处结合工程需要开发应用外掺料，外加剂、分次投料搅拌新工艺，泵送混凝土工艺，半湿式喷射混凝土，节约水泥四万多吨，对降低工程成本，提高混凝土性能，保证工程质量，推动企业技术进步起了一定作用。

一、开发应用外掺料

1. 沸石粉的试验与应用

十六、十八局在隧道混凝土施工中共掺用沸石粉 4249 吨，节约水泥近 4000 吨。十八局在隧道注浆中，每立方掺 50% 的沸石粉，取代 50% 的水泥，效果显著。通过试验及应用证明，掺沸石粉混凝土具有以下特点：

①提高强度，节约水泥。经试验分析宣化粉石粉含有大量的 SiO_2 及 Al_2O_3 (见表 1)

化学成份分析 表 1

化学成份	SiO_2	Al_2O_3	FeO_3	TiO_2	Cao	Mgo	K_2O
%	69.26	11.19	2.3	微量	2.9	0.97	3.48
化学成份	Na_2O	MnO_2	SO_3	P_2O_5	Si/Al	烧失量	
%	0.82	0.06	微量	微量	5.47	8.9	

混凝土掺入适量的沸石粉，其释放出的活性硅与活性铝与水泥水分释放的氢氧化钙反应成水合硅酸钙和水合铬酸钙，以提高混凝土强度。由于沸石粉是多孔结构，有吸附作用，易吸附水分子，它的最大吸水量可达 10—15%，从而使混凝土用水量增加，强度降低，特别是早期强度较低。为了克服这一缺陷，我们在掺沸石粉的同时，掺入减水剂，最好是早强型减水剂，可降低水灰比，促使水泥沸石粉水化反应，达到提高混凝土强度的目的。掺沸石粉，早强剂混凝土强度试验结果见表 2。

从结果表明，当掺入 15% 沸石粉，0.28% 早强减水剂，取代 15% 水泥，早期强度与基准混凝土相同，28 天强度还有提高。

②坍落度损失小，泵送性好。

试验用矿渣 525# 水泥，掺木钙减水剂，中砂，碎石，(结果见表 3)。

早强剂对沸石粉混凝土强度的影响

表 2

水泥品 种标号	拌 合 取 料					外 加 剂		沸 石 粉		陷 度	抗 压 强 度			Na ₂ SO ₄ 掺量%
	水 泥	沸 石	砂	石	水	名 称	掺 量	取 代	超系		3 天	7 天	28 天	
硅 酸 盐 525* R 型	4.2	/	8.2	15	2.31	木钙	0.25%	/	/	5	118	257	402	/
	3.57	0.63	"	"	"	"	0.28%	15%	1	4	109	219	412	/
	"	"	"	"	"	"	"	"	"	4.5	138	254	416	0.5
	"	0.756	7.85	"	"	"	0.31%	"	1.2	4	106	226	410	/
	"	"	"	"	"	"	"	"	"	4.8	128	249	418	0.5
	3.36	0.84	8.2	"	"	"	0.36%	20%	1	4	90	206	401	/
	"	"	"	"	"	"	"	"	"	5.5	102	211	400	0.5
	"	1.092	7.61	"	"	"	0.4%	"	1.3	4	90	216	405	/
	"	"	"	"	"	"	"	"	"	6	106	223	408	0.5

坍落度损失对比表

表 3

时 间	只掺外加剂混凝土		沸石粉+外加剂		
	木 钙 11—13%	损失率 %	木 钙 11—13%	沸石粉 15%	损失率
出罐时	12		12.5		
20 分	7	41.7	10		20
40 分	5	58.3	9		28
60	4	66.7	5		60

对比试验证明,掺沸石粉,减水剂,其坍落度损失比单掺减水剂小,有利于混凝土远距离运输和泵送。

2. 粉煤的开发应用

十六、十七局结合施工掺用北京加气混凝土厂和大同热电厂生产的粉煤灰共 7300 多吨,节约水泥近 5000 吨。经过试验应用证明粉煤灰作为混凝土掺合料具有以下特点:

①可提高混凝土强度,节约水泥

大秦线主要掺用的是北京加气混凝土三厂和大同热电厂生产的磨细灰。化验分析粉煤灰中含有大量的 SiO₂、Al₂O₃ 及少量的 Fe₂O₃,其 SO₃ 含量<2。掺入混凝土中与水泥化生成的氢氧化钙作用生成次生的水合硅酸钙和水合铝酸钙,使混凝土强度提高(结果见表 4)。

掺外加剂+粉煤灰混凝土同空白混凝土对比 表 4

水 泥		取化率 (%)	起量	配 合 比	每 m³	陷度	Af	抗压强度		
品种	标号		系数	(C:S:G:W:F)	水泥用 量(kg)	cm	掺量%	1 天	3 天	28 天
普通	525	/	/	1 : 2.85 : 3.31 0.663	307	17	0	30.8 100	78 100	236 100
"	"	19.5	13.7	1 : 3.205 : 4.423 : 0.772 : 0.334	247	16.5	0.57	32.3 105	81.9 105	227 96

注：(1)C:S:G:W:F 表示水泥:砂:石:水:粉煤灰；
(2)抗压强度一栏，分子表示试件实际抗压强度，分母表示所占的百分数。

但是粉煤灰反应是继水泥化反应之后，加之粉煤灰是经高温熔融，结合致密，反应慢，混凝土早期强度低，影响模板周转。在施工中掺用早强减水剂，以提高混凝土早期强度，从表 4 试验结果分析，在混凝土中每 m³ 掺 96kg 粉煤灰，掺 0.57% Af 减水剂，取代 19.5% 的水泥，混凝土各龄期强度都比空白混凝土高。

②混凝土和易性好，坍落度损失小、易于泵送

粉煤灰含有大量的玻璃球体，质地密实、表面光滑、比重比水泥小，作为掺合料不管是等量取代或是超量取代，都可增加混凝土胶结料体积，增加浆体浓度，提高混凝土粘聚性；掺入减水剂又增加了流动度，拌合物流动性好。经现场应用试验发现，掺粉煤灰外加剂混凝土坍落度损失也小于不掺粉煤灰混凝土(见表 5)。大秦线搅拌站距现场灌注混凝土工点距离远，用输送车输送，泵送车灌注混凝土，从未发生堵管。

掺粉煤灰外加剂混凝土坍落度损失测定 表 5

W —— c+f	c (kg)	f (kg)	Af (c+f) %	坍 落 度(cm)				泌水率 %
				初始	25 分	40 分	60 分	
0.55	350	0	0.5	18	14	11	6	3.9
0.56	270	80	0.5	17	14	11	7	3.5
0.6	250	100	0.5	14	12	10	7	3.1

f=粉煤灰
而且“双掺”混凝土抗渗性，抗冻性都比空白混凝土高。

二、外加剂开发有突破

担任大秦线施工的各单位广泛应用外加剂，掺用面达 100%。十八局研制的 STC 型粘稠剂系有机高分子类外加剂。粘稠剂的研制成功使我国外加剂的研制上了一个新台阶。为外加剂产品增添了新秀。这种外加剂无毒、无异味、不易燃易爆，使用安全。掺入喷射混凝土可提高各龄期强度和耐久性。其中抗压强度提高 20~27%，抗拉强度提高 26~37%，与岩面及钢

筋握裹力提高 24~25%，抗渗强度提高一倍，抗冻性、耐腐蚀性能高，干缩小对钢筋无促锈作用，减少混凝土回弹、降尘效果显著。该粘稠剂首先在大秦线别山隧道，小凌隧道，景忠山隧道使用。经铁道部劳卫所在景忠山隧道测试（结果见表 6、表 7），产生的喷射作业粉尘 4.5~6.9mg/m³；回弹量拱部 14.8%，边墙 6.7%。尔后相继在北京西单地铁车站、侯月、神朔铁路、引大入秦输水洞，北京门头沟煤矿等十多个工点应用，效果显著。至今年五月已掺用粘稠剂 441t，喷射混凝土 8.2 万 m³，减少回弹损失 1200 多 m³，节省资金 42 万元。能增加一次喷射厚度边墙 15~20cm，拱部 5~10cm，提高工效 2 倍。减少作业粉尘，有利于作业人员身体健康。掺用 STC 喷射混凝土粘稠剂具有显著经济效益和社会效益，应广泛推广应用。

粉尘浓度测定结果

表 6

采样位置	工作前(mg/m ³)		喷射作业时(mg/m ³)		由喷射生产的粉尘浓度(mg/m)
	粉尘浓度	均值	粉尘浓度	均值	
1	6.9	8.0	15.5	14.9	6.9
	8.6		14.5		
	9.2		14.5		
	7.4		15.0		
			14.5		
2	7.5	7.3	12.0	11.8	4.5
	6.5		10.8		
	7.2		11.5		
	8.0		12.8		
			12.2		
			11.4		

隧洞喷射混凝土回弹试验记录

工程名称:景钟山隧道 横洞

试验日期:1990 年 9 月

表 7

使用材料		外加剂种类及掺量		配料拌合方法:半湿裹砂			
水泥品种标号:邯鄲普硅 525 ⁴		速凝剂 783 型 8%		拌合机械:250L 强制式搅拌机			
砂细度模量:2.73		STC 型粉状粘稠剂 2%		喷射机械:HPZU—5 型喷射机			
(卵)石粒径范围 5~12mm				理论配合比:1 : 2.93 : 161 : 0.47			
每 m ³ 混凝土材料用量(kg)		水泥	砂	石	速凝剂	粘稠剂	
		431	1030	694	34.5	8.62	
喷射部位	喷射混凝土量(m ³)	喷射厚度(cm)	喷射面积(m ²)	喷射混合料量(kg)	换算湿拌合物(kg)	收集回弹量(kg)	回弹度(%)
边墙	1.39	一次喷射 25	5.56	3060	3342	224	6.7
拱部	0.093	二次喷射 20	4.65	2040	2228	330	14.8

喷射手:王濯庭

试验:王友才

监测:王焕均

三、推广混凝土分次投料搅拌工艺

分次投料搅拌工艺是将砂、石骨料部分水拌合，表面湿润后再投入水泥搅拌，使骨料表面粘附一层较小水灰比的水泥皮壳(叫造壳作用)，然后投入剩余水，使骨料外层水泥壳糊化在骨料之间形成充满较小水灰比梯度的水泥浆体(糊化作用)。通过造壳糊化作用改善了混凝土内部孔结构，毛细孔特别是大毛细孔减少，提高混凝土强度和耐久性。为了推广应用分次投料搅拌工艺，我们组织有关人员对在大秦线使用的SZS—100P日式拌合楼进行改进，将常规的投料搅拌程序改为分次投料搅拌程序，全部推广分次投料工艺。十六局使用的日式拌合楼按“双裹”法拌合250级混凝土，其各龄期强度都有提高(见表8，表9)。

200*混凝土裹砂石法节约水泥强度结果 表8

搅拌方法	混凝土配合比	每m³水泥用量(kg)	节约水泥数量	水泥品种标号	坍落度(cm)	7天强度(kgf/cm²)	28天强度(kgf/cm²)
裹砂石法	1:1.90:4.20:0.55	313	7%	矿渣325 [#]	3.4	129	201
裹砂石法	1:1.90:4.20:0.55	313	7%	矿渣325 [#]	3.6	133	211
裹砂石法	1:1.90:4.20:0.55	313	7%	矿渣325 [#]	4.0	134	218
裹砂石法	1:1.90:4.20:0.55	313	7%	矿渣325 [#]	3.8	117	206
平均						128	209

250*混凝土常规搅拌和裹砂石搅拌强度结果 表9

搅拌方法	混凝土配合比	每m³水泥用量(kg)	水泥品种标号	坍落度(cm)	7天强度(kgf/cm²)	28天强度(kgf/cm²)
常规法	1:1.56:3.29:0.51	373	矿渣325 [#]	3.0	146	258
常规法	1:1.56:3.29:0.51	373	矿渣325 [#]	3.5	149	239
常规法	1:1.56:3.29:0.51	373	矿渣325 [#]	3.2	123	231
常规法	1:1.56:3.29:0.51	373	矿渣325 [#]	3.1	131	281
平均					137	252
裹砂石法	1:1.56:3.29:0.51	373	矿渣325 [#]	3.5	156	295
裹砂石法	1:1.56:3.29:0.51	373	矿渣325 [#]	3.5	136	286
裹砂石法	1:1.56:3.29:0.51	373	矿渣325 [#]	3.2	135	279
裹砂石法	1:1.56:3.29:0.51	373	矿渣325 [#]	3.3	140	284
平均					142	286

其中200级混凝土7天强度比常规法提高15.8%，28天强度提高18%。每m³混凝土节约水泥23kg，28天强度还提高3.5%。250级混凝土7天强度提高3.6%，28天强度提高13%。每m³混凝土节约7%的水泥强度与常规法相同。十七局在湖东车站施工中，将HZ—25

型混凝土搅拌站改为分次投料程序,按“双裹”法拌合混凝土,7天、28天强度比常规法提高7.5—29%、3.6—21%。(见表10)。

混凝土不同拌法强度对照表

表 10

拌合方法	水泥品种及标号	理论配合比	每 m ³ 混凝土水泥用量 (kg)	每 m ³ 混凝土粉煤灰用量 (kg)	R ₇ (kg/cm ²)	R ₂₈ (kg/cm ²)	含砂率 (%)
传统	普通 525 #	1 : 3.46 : 6.00 : 0.675	226	0	163	264	36.5
双裹	普通 525 #	1 : 3.46 : 6.00 : 0.675	226	0	283	396	36.5
传统	普通 525 #	1 : 3.55 : 6.07 : 0.690	225.5	0	202.6	287	36.9
双裹	普通 525 #	1 : 3.55 : 6.07 : 0.690	225.5	0	247	330.6	36.9
传统	普通 525 #	1 : 2.80 : 4.90 : 0.50	280	0	305.7	432.2	36.4
双裹	普通 525 #	1 : 3.44 : 5.16 : 0.68	248	0	290.7	413	40
双裹	普通 525 #	1 : 2.85 : 5.20 : 0.60	265.9	0	325.8	440	35.4
传统	普通 525 #	1 : 2.30 : 4.40 : 0.52	304	0	124.5	285.6	34.3
传统	普通 525 #	1 : 2.50 : 4.80 : 0.46	302.5	0	160.5	258	34.2
双裹	普通 525 #	1 : 2.90 : 5.10 : 0.47	274.6	0	190	313.5	36.3

注:1. 本基准混凝土为干硬性混凝土。

2. 水泥为 R 型普通 525 #。

3. 砂子 MK=3.64, 石子 d_{max}=25mm 河卵石。

4. 石子湿润后经测定含水率为 3~4%。

在达到设计强度要求条件下,每 m³ 混凝土可节约水泥 8—11%。

实践证明分次投料搅拌工艺,在不增加设备和资金投入的条件下,仅改变投料程序,就可改善混凝土物理力学性能,达到节约水泥的目的,经济效益显著,应大力推广应用。