

# 硅灰混凝土及其在铁路桥梁中的应用

铁道部科学研究院

铁道部株洲桥梁厂

铁道部房山桥梁厂

铁道部专业设计院

(执笔 钟美素)

本文介绍了硅灰混凝土拌合物性能和力学性能的研究结果,并介绍了80MPa级超高强硅灰混凝土在40m后张预应力铁路桥梁中的应用研究,以及以节约水泥、缩短养护时间为目的的硅灰混凝土在16m先张铁路桥梁中的应用研究。

## 硅灰混凝土性能

### 1. 硅灰混凝土拌合物性能

硅灰属火山灰质高效掺合料,颗粒极为微细,在混凝土中可填充于水泥颗粒之间的空隙,因而用硅灰取代部分水泥的硅灰混凝土比普通混凝土的和易性好,硅灰混凝土显得粘稠,不易离析。在同坍落度条件下,硅灰混凝土的需水量比普通混凝土大,硅灰取代量越多,需水量越大。试验结果证明:硅灰取代量与需水量呈线性关系,取代量每增加1% (即5kg),需水量约增加7kg。

硅灰混凝土需水量的增加可通过使用减水剂得以控制。试验结果表明:在胶凝材料总用量为 $500\text{kg}/\text{m}^3$ 、坍落度为10cm条件下,硅灰取代量与FDN减水剂的掺量近似线性关系,取代量每增加1%,FDN的掺量约增加0.05%。

在配制硅灰混凝土时,应视硅灰取代量的大小适当地减小混凝土的砂率。

### 2. 硅灰混凝土的强度发展

不掺用减水剂,用增加用水量的办法保持混凝土坍落度为一定值,所得试验结果表明:无论硅灰取代量多大,其早期强度均低于基准混凝土。硅灰取代量为5%时,28天强度值与基准混凝土相同;取代量超过5%,28天强度降低,取代量越大,强度降值越大,这是因为硅灰取代量越大,混凝土需水量增值越大,因而水胶比增值越大所致。但

硅灰取代量为5%,尽管需水量增大了19%,28天强度仍与不掺硅灰的基准混凝土相同,这一点足以说明硅灰的高活性。

可以推知,若用掺高效减水剂的办法保持硅灰混凝土与基准混凝土坍落度一致,水灰比(即用水量)相同,那么硅灰混凝土的强度一定会高于基准混凝土,图1的试验结果证实了这一点。当水胶比和坍落度均相同时,硅灰取代量为5%、10%、20%时,3天强度均高于基准混凝土;但取代量20%的混凝土3天强度比取代量5%和10%的要低。对28天强度而言,取代量在20%以内,随硅灰取代量的增加其强度值也随之增加。

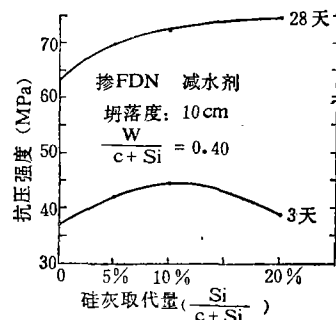


图1 掺用减水剂的硅灰混凝土中硅灰取代量与强度关系

由此,我们认为采用同时掺用硅灰和高效减水剂的双掺技术配制高强混凝土是更值得推荐的。

### 3. 双掺技术的节约水泥效果

采用同时掺用硅灰和高效减水剂的混凝土（简称双掺混凝土）比只掺高效减水剂的混凝土（简称减水剂混凝土）节约水泥效果

明显提高。用天马牌525号硅酸盐水泥和唐山硅灰所做试验结果如表1。

试验结果充分说明，双掺混凝土节约水

双掺技术的节约水泥效果

表 1

	编 号	水泥用量 C(kg)	外 加 料	坍 落 度 (cm)	$f_{cc}$ (MPa)	效 果	
						$\Delta C$ (kg)	$\Delta f_{cc}$ (MPa)
第 一 组	1	400		13.5	44.4	0	0
	3	315	硅灰 + FDN	17	55.0	-85	+10.6
第 二 组	7	370	FDN	17	46.7	0	0
	9	270	硅灰 + FDN	18	50.0	-100	+3.3
第 三 组	10	400		6.5	47.1	0	0
	11	380	FDN	16	54.6	-20	+7.5
	12	300	硅灰 + FDN	8	53.2	-100	+6.1

泥的效果十分显著。在使用高效减水剂的情况下，1kg硅灰可取代3~4kg水泥。利用硅灰高效节约水泥的特点，可将硅灰用于较大体积的混凝土工程。

#### 4. 硅灰混凝土对蒸汽养护的适应性

当水泥用量为400kg时，采用双掺技术，经50℃蒸汽养护48小时（包括静停时间），混凝土强度即可达53MPa，蒸养效果相当显著。当配合比完全相同的两组硅灰混凝土，蒸养恒温温度为75~80℃时，10小时出池强度为56.6MPa，而恒温温度为55~60℃时，10小时出池强度仅为39.6MPa，说明硅灰混凝土更适宜高温蒸汽养护。

#### 5. 硅灰混凝土的力学性能

硅灰混凝土（双掺）与减水剂混凝土力学性能的比较是在等强度\*条件下进行的，试验结果及等强度化比较结果见表2。

两种混凝土28天强度基本相同。在各龄期硅灰混凝土的劈裂抗拉强度系数 $K_{ts}$ 均比减水剂混凝土明显提高。这是由于掺入硅灰使水泥石中C—S—H凝胶增多，浆体致密，混凝土内界面区粘结力增强所致。

#### 6. 硅灰混凝土的收缩与徐变

在等同条件下试验表明，硅灰混凝土与

减水剂混凝土的早期收缩值相差不多，但一年龄期时硅灰混凝土比减水剂混凝土收缩值要小约 $100 \times 10^{-6}$ 。28天加荷时，硅灰（双掺）混凝土的徐变度无论早期还是后期都比同强度的减水剂混凝土小得多，约小50%，徐变度终极值小于 $20 \times 10^{-6}/MPa$ 。

### 80MPa级超高强硅灰混凝土 在40m后张预应力铁路 桥梁中的应用

硅灰混凝土抗拉强度的提高，收缩和徐变的减小说明它适用于预应力结构。铁道部科学研究院与株洲桥梁厂试制的第二孔40m后张预应力混凝土梁中进行80MPa级硅灰混凝土材料与灌注工艺试验，即在原设计60MPa级混凝土梁的截面尺寸、布筋和张拉应力不变的基础上，研究用80MPa级硅灰混凝土浇注梁体的可能性。1986年9月梁体浇注完成，10月由专业设计院主持进行了静载试验，梁体性能良好，这是我国首次将80MPa级超高强硅灰混凝土试用于铁路桥梁并获得成功的一例，该孔梁已架设于衡广复线江村南桥。

\*有关等强度化比较法的介绍详见《试谈减水剂对混凝土力学性能的影响之比较方法》，《混凝土及加筋混凝土》1985.5。

两种混凝土不同龄期下的力学性能

表 2

混凝土类别		减水剂混凝土			硅灰混凝土		
外掺料		FDN			FDN+硅灰(宝鸡)		
坍落度(cm)		3.3			9.2		
龄期		3天	7天	28天	3天	7天	28天
立方强度 $f_{cc}$ (MPa)		54.0	65.9	72.2	46.8	62.2	74.2
劈拉强度 $f_{ts}$ (MPa)		5.18	5.11	5.52	5.04	5.45	6.24
轴压强度 $f_{cp}$ (MPa)		47.6	49.1	60.0	42.0	52.1	62.0
弹性模量 $E_c$ ( $\times 10^4$ MPa)		3.43	3.70	4.08	3.30	3.58	4.15
等 强 度 化 比 较	$K_{ts} = \frac{10f_{ts}}{(10f_{cc})^{2/3}}$	$\frac{0.781}{100}$	$\frac{0.675}{100}$	$\frac{0.686}{100}$	$\frac{0.836}{107}$	$\frac{0.748}{111}$	$\frac{0.761}{111}$
	$K_{cp} = \frac{f_{cp}}{f_{cc}}$	0.881	0.745	0.831	0.897	0.838	0.836
	$E_{\#} = \frac{10^5}{2.3 + \frac{27.5}{f_{cc}}} (\times 10^4 \text{MPa})$	3.56	3.63	3.73	3.46	3.65	3.74
	$\frac{E_c - E_{\#}}{E_{\#}}$	-3.7%	+0.7%	+9.4%	-4.9%	-2.0%	+10.9%

注：表中横线下数值表示同龄期下硅灰混凝土对减水剂混凝土的比值。

### 1. 原材料

采用新化水泥厂的525号硅酸盐水泥；湘江中砂，细度模数2.7~2.8；碎卵石，粒径5~20mm；湛江外加剂厂FDN高效减水剂；上海铁合金厂硅灰。

### 2. 梁体灌制与养护

梁体一孔二片，每片梁的混凝土用量为 $51\text{m}^3$ ，水泥用量 $450\text{kg}/\text{m}^3$ 。采用强制式搅拌机，每次搅拌 $1\text{m}^3$ 混凝土，硅灰以干粉状自搅拌机观察孔投料，搅拌时间比普通混凝土略加延长。在灌制过程中加强了桥面抹平工序，随振捣随抹面随覆盖。梁体灌制顺利，每片梁需4小时全部灌制完毕。

采用 $40\sim 50^\circ\text{C}$ 低温蒸汽养护，养护过程中对混凝土内温进行了量测，其最高温度为 $61\sim 62^\circ\text{C}$ 。梁体蒸汽养护过程中注意用随梁养护的试件强度控制预留钢筋管道的拔出时间，梁体蒸汽养护 $48\sim 72$ 小时拆模，拆模后检查梁体表面的灌制质量良好。

### 3. 80MPa级硅灰混凝土的力学性能 力学性能试验的全部试件在车间制作，

为使试件具有代表性，混凝土拌合物分别取自六盘混凝土，用振动棒成型，一部分试件随梁养护，待梁体拆模后试件移入养护室，一部分试件一直随梁养护，一部分试件进行标准养护。试验项目包括立方体抗压强度 $f_{cc}$ 、轴心抗压强度 $f_{cp}$ 、劈裂抗拉强度 $f_{ts}$ 和弹性模量 $E_c$ ，试验结果见表3。由于试件用料选自六盘混凝土，一组试件（三个）分别取自三盘混凝土，在随梁养护过程中试件随机分布于梁体各部位，因而试验结果具有总体代表性。

试验结果说明：灌梁混凝土无论采用低温蒸汽养护还是自然养护，其28天强度均达90MPa以上，弹性模量均达 $4.3 \times 10^4$ MPa以上，劈裂抗拉强度均达6MPa以上，约相当于轴心抗拉强度5.4MPa。1年龄期的强度和弹性模量均有少量增长。采用 $40\sim 50^\circ\text{C}$ 的低温蒸汽养护时，3天强度即可达86.3MPa，是28天的90%以上，弹性模量可达到 $4.3 \times 10^4$ MPa，几乎达28天的100%。再次证明硅灰混凝土适宜蒸汽养护。

80MPa级硅灰混凝土力学性能

表 3

龄 期	17小时	48小时	72小时	7天	14天	28天	3个月	1年	
蒸 汽 养 护	$f_{cc}$ (MPa)	48.5	78.4	86.3	95.0	92.0	93.0 (95.8)	102.2	96.4
	$f_{ts}$ (MPa)				6.55	—	7.42		6.93
	$f_{cp}$ (MPa)			79.0	81.3	81.1	87.0	86.8	95.4
	$E_c$ ( $\times 10^4$ MPa)			4.321	4.432	4.347	4.372	4.384	4.522
	$f'_{cp}$ (MPa)			78.1	76.9	83.3	84.2	91.4	91.9
标 准 养 护	$f_{cc}$ (MPa)			$\frac{61.2}{59.1}$	$\frac{80.6}{77.8}$	$\frac{85.6}{82.6}$	$\frac{103.6}{100}$	$\frac{110.1}{106.3}$	$\frac{107.5}{103.8}$
	$f_{ts}$ (MPa)			$\frac{4.05}{67.4}$	$\frac{5.22}{86.9}$	—	$\frac{6.01}{100}$		$\frac{6.79}{113.0}$
	$f_{cp}$ (MPa)			46.3	63.6	73.2	70.7	94.1	92.3
	$E_c$ ( $\times 10^4$ MPa)			$\frac{3.528}{81.7}$	$\frac{3.946}{91.4}$	$\frac{4.171}{96.6}$	$\frac{4.319}{100}$	$\frac{4.483}{103.8}$	$\frac{4.497}{104.1}$
	$f'_{cp}$ (MPa)			$\frac{49.5}{61.6}$	$\frac{64.1}{79.7}$	$\frac{75.0}{93.3}$	$\frac{89.4}{100}$	$\frac{89.0}{110.7}$	$\frac{87.4}{108.8}$

注：1. 横线下数值表示相对于28天的比值；2.  $f'_{cp}$ 表示试件做完弹性模量后的轴心抗压强度值；3. ( ) 内数字表示一直随梁养护的试件。

#### 4. 梁体静载试验

梁体在预应力钢筋100%张拉后30天进行静载试验。加载如图2示意。

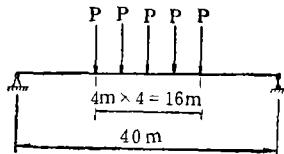


图 2 加载示意图

采用逐级加载试验，在各级荷载下观察梁体下缘是否开裂，同时用水平仪测量梁体挠度 $f_{\#}$ ，并推算梁体弹性模量 $E$ 值，试验结果见表4。

试验结果可知，静活载下 $f_{\#}/L=3.5/4000=1/1143<1/800$ ，说明梁体刚度满足设计要求，由 $k_f=1.25$ 未见梁体开裂，说明梁体抗裂性好。

**硅灰混凝土在16m先张预应力  
低高度曲线梁上的应用**  
铁道部科学研究院与房山桥梁厂以缩短

梁体静载试验结果 表 4

抗裂安全系数 $K_f$	静活载 0.924	1.00	1.10	1.20	1.25
实测梁体挠度 $f_{\#}$ (cm)	3.50	3.90	4.50	4.95	5.10
推算梁体弹性模量 $E$ ( $\times 10^4$ MPa)	5.386	5.332	5.188	5.232	5.329
裂缝观察	无	无	无	无	无

蒸养时间，加快模具周转为目的共同进行了硅灰混凝土在16m先张低高度曲线梁上的应用研究。在1987年3月进行梁体灌制，气温较低。在一个张拉台座上同时灌制三片梁，其中一片采用硅灰（双掺）混凝土，另两片为减水剂混凝土，同时对两种混凝土的性能进行试验，并做梁体静载试验。

#### 1. 原材料

采用大同325号快硬硅酸盐水泥；中砂和粒径5~30mm的碎石；湛江外加剂厂FDN高效减水剂；唐山铁合金厂的硅灰。

#### 2. 梁体灌制

各片梁的混凝土用量为 $16.5\text{m}^3$ ,减水剂混凝土的水泥用量为 $500\text{kg}/\text{m}^3$ ,硅灰混凝土则为 $400\text{kg}/\text{m}^3$ ,坍落度平均值前者为 $7.7\text{cm}$ ,后者为 $9\text{cm}$ 。梁体的振捣成型无底振,采用侧振与插入式振捣器成型。在硅灰混凝土梁与减水剂混凝土梁向分别预埋了一个充气式压力温度计,埋设部位为梁端部下缘的中心,用以测量梁体内温,同时对梁体的蒸汽养护温度也进行了量测。温度测量结果见图3。

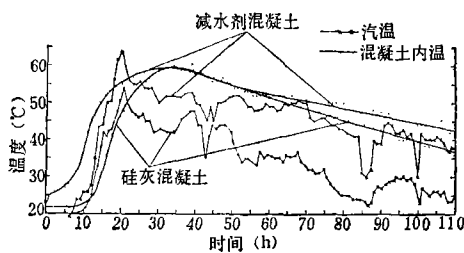


图3 混凝土内温与汽温实测结果

由于硅灰的火山性质,加之硅灰混凝土的减水剂掺量比减水剂混凝土大,致使硅灰混凝土的凝结时间延长,推迟了混凝土内温开始上升的时间,一旦硅灰混凝土凝结时间一到,内温急剧上升,这是因为高活性硅灰与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 进行二次水化而生

成C-S-H凝胶,使 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浓度下降,从而加速了水泥水化的进行,也同时促进了自身的二次水化,两种水化的共同作用使得硅灰混凝土内温上升速度比减水剂混凝土明显加快,早期生成水化物比例加大,因而具有早强性。虽然硅灰混凝土具有二次水化,但因水泥用量比减水剂混凝土少 $100\text{kg}$ ,因而总的水化热并不比减水剂混凝土高,混凝土最高温升点说明了这一点。实际上,硅灰(双掺)混凝土的强度高于减水剂混凝土,若控制到同强度,硅灰混凝土的最高温升还会因水泥用量的进一步减少而降低。

### 3. 混凝土的力学性能

混凝土试件由同一盘混凝土中取料制作,插入式振捣器捣实,试件全部随梁养护。混凝土力学性能试验结果见表5。等强度化比较结果见表6。

由于施工时气温较低,且时有供汽不足情况,造成蒸汽温度波动较大,也造成试件强度发展不平衡。但试验结果仍充分显示了硅灰混凝土的早强性,在节约 $100\text{kg}$ 水泥的条件下,62小时强度即达到 $62\text{MPa}$ ,弹性模量达 $3.5 \times 10^4\text{MPa}$ ,28天的强度和弹性模量均高于减水剂混凝土,特别是劈裂抗拉强度大

两种混凝土的力学性能

表5

混凝土外掺料		FDN				FDN + 硅灰			
水泥用量		500kg				400kg			
混凝土坍落度		7.9 cm				9.7 cm			
蒸汽温度		$50 \pm 5^\circ\text{C}$				$45 \pm 5^\circ\text{C}$			
项 目	$f_{cc}$ (MPa)	$f_{ts}$ (MPa)	$f_{cp}$ (MPa)	$E_c$ ( $\times 10^4\text{MPa}$ )	$f_{cc}$ (MPa)	$f_{ts}$ (MPa)	$f_{cp}$ (MPa)	$E_c$ ( $\times 10^4\text{MPa}$ )	
蒸养48小时	39.7				55.7				
蒸养62小时					57.2			3.510	
蒸养72小时	44.2	3.98			57.9	4.41		3.510	
蒸养8.5天	52.0			3.499	66.5		56.9	3.618	
蒸养后至28天	59.9	4.33	46.1	3.280	65.6	5.59	57.1	3.499	
44天静载	58.7	4.17	53.9	3.355	74.4	5.58	60.6	3.586	

等强度化比较结果

表 6

龄 期	28天		44天	
	FDN	FDN + 硅灰	FDN	FDN + 硅灰
混凝土类别				
$K_{cp} = \frac{f_{cp}}{f_{cc}}$	0.77	0.87	0.92	0.81
$K_{ts} = \frac{10f_{ts}}{(10f_{cr})^{2/3}}$	$\frac{0.61}{100}$	$\frac{0.74}{121}$	$\frac{0.59}{100}$	$\frac{0.68}{115}$
$E_{\text{计}} = \frac{10^5}{2.3 + \frac{27.5}{f_{cc}}}$	3.624	3.678	3.612	3.746
$\frac{E_{\text{实}} - E_{\text{计}}}{E_{\text{计}}}$	-9.5%	-4.9%	-7.1%	-4.3%

注：横线下数值为相对比值

大提高了，65.6MPa的硅灰混凝土劈裂抗拉强度达5.59MPa，用等强度化比较方法分析：28天龄期 $k_t$ ，提高21%，44天提高15%，即在同强度条件下，硅灰混凝土比减水剂混凝土劈裂强度明显提高。弹性模量28天提高4.6%，44天提高2.8%。由于石子质量关系，两种混凝土的弹性模量均偏低。

硅灰混凝土在先张梁中的应用研究，再次说明采用双掺技术的硅灰混凝土在大幅度节约水泥的条件下仍保持早强、高强性能，可加速台位周转。

### 结 语

对硅灰混凝土性能和应用的研究是在高强范围内进行的。研究表明，采用双掺技术的硅灰混凝土具有早强、高强性能，特

别是它的抗拉强度显著优于普通混凝土，同强度条件下收缩值和徐变度均小于普通混凝土，所有这些性能均可在节约水泥情况下获得。说明硅灰混凝土适用于预应力结构。

80MPa级超强硅灰混凝土在40m后张梁中试用成功，使高强混凝土应用于大跨度铁路桥梁成为可能。据预测，40m梁采用80MPa级混凝土进行设计后，将使每片梁的自重由134t降至120t左右，这将有利于大跨度预制梁的运输和架设，促进我国铁路预应力桥梁的发展。

必须指出，用于硅灰的回收耗电极大，目前国内生产厂家很少，料源乏缺，因此，尽管硅灰混凝土有着许多良好性能，也只能在特殊工程中应用。



## 大直径桩(墩)研讨会在深圳召开

1988年3月17日至25日，由中国建筑业联合会深基础协会与深圳土木建筑协会在深圳联合召开了大直径桩(墩)学术研讨会。

参加会议的代表来自16个省、市、特区，10个部委及设计院、研究院、大专院校的专家、教授共155人。大会收到论文50篇，有43名同志进行了大会发言。内容涉及大直径桩的设计，受力机理、施工工艺、质量管理及动测试桩等。研讨了大直径桩(墩)的端承力与侧壁摩阻力的计算及实测结果；钻孔及扩孔机理，施工质量的控制及检测以及各种动测试桩的方法及其适用条件等问题。并提出建议，为适应我国幅员辽阔，土质复杂情况，应因地制宜制订一些地区性的桩基规范；工艺上应主要解决复杂地层的成孔、防止流砂、塌孔；人工挖工扩孔的安全及工效等问题；对动测试桩应建立大量的动静对比资料，公开试验方法以促进动测技术的提高。会议提出明年将召开深基开挖的支护技术研讨会。

(五群)