

四川水泥制品学术论文选编

四川省硅酸盐学会水泥制品专业委员会

四川省水泥制品行业协会 合编

四川省水泥制品技术情报网

前 言

四川省水泥制品行业协会、四川省硅酸盐学会水泥制品专业委员会、四川省水泥制品技术情报网，分别于86年、80年和78年成立。“三会”均挂靠在四川省水泥制品厂。“三会”成员包括行政机关、科研单位、大专院校、生产企业。分别隶属于铁道、交通、水电、邮电、轻工、乡镇、冶金、建工、建材等系统。

“三会”自成立以来，一直是联合开展活动，这样发挥各自的优势和特点，既有来自科研单位和大专院校的理论研究，科研成果，又有生产企业的生产实践和管理经验。“三会”活动内容丰富，形式多样，互相学习，取长补短。促进了科研成果转化为生产力，并有力地推动了我省水泥制品行业的发展。

为了适应当前经济工作的需要和进一步促进我省水泥制品科研、教学、企业的发展。“三会”办公室，从“三会”主办的《四川水泥制品科技与信息》内部季刊和历年学术年会上发表的学术论文和经验交流资料中，选择一部分，汇编成《四川水泥制品学术论文选编》，以供大家参考，存阅。

由于编辑水平和时间所限，搜集的内容很不广泛全面，有的好文章还未列入，敬请谅解。

《选编》编委主任：江昌钧

《选编》编委委员：曹荣华 徐 镇 任仁南 晏文钊

《选编》责任编辑：童星宽 相 华

《四川省水泥制品学术论文选编》编委会

1991年8月1日

四川省水泥制品学术论文选编

目 录

一、混凝土及水泥制品研究

- 1、特细砂配制优质混凝土的研究.....陈惟时 (1)
- 2、特细砂水泥基复合材料的断裂行为.....刘南渊 (6)
- 3、特细砂混凝土的配制和应用.....张大德 (13)
- 4、卵石粒径对特细砂砼强度的影响.....陈普法 (17)
- 5、混凝土非破损及半破损测强技术的应用.....晏文钊 (24)
- 6、石子最大粒径与砼强度关系的研究.....陈寒斌等 (30)
- 7、水泥混凝土的凝结硬化过程和渗透性原理.....吕昌高 (34)
- 8、水泥混凝土骨料的碱活性研究.....肖争鸣 (45)
- 9、掺硅灰硅单轴压力荷载下的应力—应变曲线及其破坏分析.....郑盛娥 (52)
- 10、重晶石砼及加重块的生产与使用.....童星宽 (58)
- 11、预应力灰砂砼建筑构件研究.....蒲心诚等 (61)
- 12、混凝土骨料效应的探讨.....吕昌高 (67)

二、水泥电杆

- 1、环形预应力混凝土电杆计算.....梁大尧 (75)
- 2、从试验结果谈电杆强度计算.....成都铁塔厂 (83)
- 3、离心电杆预应力钢筋应力传递长度的试验研究.....周沛明 (87)
- 4、法向压应力对预应力砼电杆纵向裂纹的影响.....梁大尧 (97)
- 5、浅析预应力电杆预应力值的损失.....童星宽 (106)
- 6、环形部分预应力混凝土电杆结构设计.....李向阳 (109)
- 7、改有限预应力杆为部份预应力杆取得初步成效.....谢代好 (114)
- 8、一种新的预应力电杆锚固装置.....曾林君 (116)
- 9、校直电杆钢模的压床.....林文运 (117)
- 10、电杆钢圈卷制机.....林文运 (118)
- 11、电杆上料机的改进.....童星宽 (119)
- 12、组装锥形杆上段预应力简易生产方法.....童星宽 (120)
- 13、城市路灯的造型艺术及灯杆生产.....童星宽 (121)
- 14、对环形钢筋混凝土电杆离心制度的看法.....李孝镐 (122)
- 15、用变极调速系统拖动离心电杆机.....林文运 (123)
- 16、环形砼电杆外观缺陷的分析、形成原因及解决办法.....刘金明 (126)
- 17、电杆拉线盘设计.....曾苑屏 (129)

- 18、锥形电杆抗弯试验台座及滚动支座架的改进.....童星宽 (132)
- 19、环形锥形电杆端部倾斜偏差检测专用角尺.....李维成 (134)

三、水泥压力管

- 1、悬辊工艺生产 $\phi 1600$ 毫米预应力钢筋砼管产品开发研究报告.....江昌钧 (135)
- 2、悬辊法工艺用于钢筋砼滤水管、井壁管的生产.....李时伦 (149)
- 3、“三阶段”悬辊工艺承口缺料的质量分析及解决措施.....曹荣华 (157)
- 4、悬辊压力计算方法的探讨.....徐共和 (158)
- 5、也谈悬辊压力的计算.....张吉元 (162)
- 6、处于稳态工作的悬辊制管机的钢模摆撼分析.....刘承 (165)
- 7、提高悬辊管管芯抗渗性经验.....黄德康 (168)
- 8、用悬辊法制作管芯应注意的问题.....陆凌 (171)
- 9、用挤压喷涂法制作三阶段管保护层.....宋文海 (173)
- 10、用径向压制法生产自应力水泥管.....吕昌高 (175)
- 11、提高自应力管工作压力的基本途径及工艺控制.....曹荣华 (177)
- 12、钢筋混凝土输气管石蜡内压浸渍工艺研究.....李义和陈代清 (179)
- 13、水玻璃溶液加压浸渍水泥压力管.....童星宽 (184)
- 14、带钢筒预应力砼管生产方法及评价.....吕昌高 (186)
- 15、在三阶段预应力压力管上开孔接入岔管的试验研究.....刘长君 (190)
- 16、预应力管的开孔与鑿切.....何维华 (202)
- 17、承插式异形管水平支墩的设计.....何维华 (204)
- 18、水泥压力管道设计施工的若干问题.....何维华 (209)
- 19、水泥压力管道在敷设中的角度借转.....何维华 (214)
- 20、自应力水泥中铝的酸溶法快速测定.....李有俊 (216)
- 21、压力管道的水锤防治探讨.....曾祥伟 (218)
- 22、输水用水泥压力管水压检验标准和水锤压力之间的关系.....李生庆 (231)

四、石棉水泥制品

- 1、半干法生产的石棉水泥无压管在房建中的使用情况.....张吉元 (240)
- 2、对石棉水泥波瓦堆码损坏问题的探讨.....白美富 (243)

五、砼外加剂研究与应用

- 1、有关砼减水剂的减水作用机制及使用特性方面的某些问题.....黄敏求 (246)
- 2、提高特细砂砼的性能研究(CM剂在特细砂砼中应用的初步试验报告).....陈惟时 (258)
- 3、N—804 减水剂的生产和试验及应用.....罗万华 (266)
- 4、木质素磺酸钙减水剂及木质素磺酸钙——芒硝复合剂的试验及应用.....吴海潮 (273)
- 5、MZS—A型砼复合早强剂试验情况介绍.....伐淑文 (281)

六、砼与水泥制品养护

- 1、混凝土养护坑的平衡及热效率计算.....林方辉 (284)
- 2、混凝土养护坑的合理围护结构.....林方辉等 (288)

特细砂配制优质混凝土的研究

重庆建筑工程学院 陈惟时

用特细砂配制混凝土有利于就地就近取材,降低混凝土成本,减少车辆运输费用和能源消耗,对加速建设有利。

特细砂不仅能够配制中、低标号混凝土,而且还能配制优质高强混凝土。而其水泥用量并不比同标号的粗、中砂混凝土多,只要掌握其配制技术和特点,中、低标号的特细砂混凝土每 m^3 的水泥用量还可比同标号的中砂混凝土少 $60\sim 80kg(1m^3)$ 。

1、研究的理论依据及配制原则

一般认为特细砂混凝土存在水泥用量多,徐变和收缩等缺点,故在使用范围上受到了很大限制。我们考虑这些缺点,可以提高水泥浆与集料的界面粘结强度和提高混凝土的密实度,同时提高水泥石的强度来克服。

国内外许多学者的研究,认为以石灰石作混凝土的集料与水泥石界面的粘结强度最高,两者的结合有化学作用,机械啮合作用和物理化学作用。(如J、FARRAN指出方解石和白云石与水泥石的粘结最牢;C、P、TOGNAN等认为石灰石是多孔材料,其与水泥石粘结界面的密实度远高于石英与水泥石粘结界面的密度,且抗渗透性好;THOMAS的研究列出石灰岩、花岗岩、砂岩与水泥石界面的粘结强度依次为414、368和284Psi;王幼云、童三多厂研究碳酸盐微细集料的快硬机理证明有CACH生成,而且长期稳定存在,同时发现碳石微细集料比粉煤灰矿渣和砂岩等的微细集料与CS的水化程度高,说明其具有较好的界面效应;PINTER等研究方解石、CA或CAF水之间的反应,生成物为CACH,在反应中消耗了较多的CA。

我们所采用20mm的石灰石碎石作集料这种碎石本身具有较好的颗粒级配,其中含有部分小于5mm粒径的颗粒和细微粉末,在混凝土中与特细砂混和能使砂子颗粒级配改善,空隙率减少,提高了混凝土的和易性,加以石灰石表面粗糙具有微孔,增加了机械啮合力,其微孔吸水能减少集料表面的水膜层厚度,故能提高混凝土的密实度和强度。

2、原材料的性能详见表1、2、3

425号矿渣硅酸盐水泥性能

表1

安 定 性 (沸 煮 法)	强 度 (Mpa)			
	抗 折		抗 压	
	R ₇	R ₂₈	R ₇	R ₂₈
合 格	4.49	6.88	24.3	44.5

分计筛余 (%)	筛孔尺寸 (mm)				
	15	10	5	2.5	<2.50
	0	27.8	36.8	20.4	14.6
针片状颗粒 (%)	>35				

特细砂性能及筛分

表 3

分计筛余 (%)	筛孔尺寸 (mm)						
	5	2.5	1.25	0.63	0.135	0.16	0.16
	0	0	0	0	5.1	64.4	30.5
细度模数	0.695						
比表面积 (cm ² /g)	231						

3、研究试验结果

3.1 主要力学性能

特细砂混凝土主要力学性能

表 4

力学性能 (Mpa)	R ₇	R ₂₈	R ₆₅	R ₁₄₅	中砂砼
压 强 (Mpa)	49.6	>60	>70	>90	
劈 拉 (Mpa)	4.93	4.7~6.4	5.4~6.1	6.04~6.86	5~7
拉压比 (%)	9.5	6.8~9.7			
弯曲强度 (Mpa)	7.11	9.2~10.2			
弯压比 (%)	14.3	14~16			11.5
轴压强度 (Mpa)	43.2	53.5~66.8			
轴压比 (%)	89.1	77.8~97.2			>75
弹模 (×10 ⁵ Mpa)	0.308	0.378~0.531			0.358

从表 4 可见这种混凝土的主要力学性能有如下特点:

- ① 龄期 28 天抗压强度在 60Mpa 以上。
- ② 龄期 28 天劈拉强度为 4.7~6.4Mpa;
- ③ 拉压比为 6.8~9.7% (同标号的中砂混凝土为 5~7%) ;
- ④ 抗弯曲 (折) 强度为 9.2~10.2Mpa (水泥软练 625 号水泥为 7.8Mpa), 弯压为 14~16% (同标号的中砂混凝土为 11.5%) ;
- ⑤ 轴心抗压强度为 53.5~66.8Mpa, 轴压比为 77.8~97.2% ;

⑥ 静力弹性模量为 $(0.378 \sim 0.531) \times 10^5 \text{Mpa}$, 超过 C_{60} 混凝土在规范中规定 $0.358 \times 10^5 \text{Mpa}$ 。

从长期强度来看, 试件的标准偏差 (S) 和变异系数 (C) 均较小, 可见我们用 425 号水泥和特细砂及石灰石碎石所配制的混凝土, 其强度能超过所用水泥的强度等级的优质混凝土。

误差计算 表 5

组别	龄期 (b)	平均强度 (Mpa)		标准偏差	变异系数	试件数
		抗压	劈拉	(S)	C_v (%)	(n)
Z	200	80.3		4.8	6.0	13
Z	200		6.67	0.57	8.63	11
a—1	65	78.6		5.9	7.7	26
b—1	65	75.2		5.3	7.2	22
c—1	65	70.9		5.2	4.6	23
A—a	145	90.0		10.5	11.9	14
A—b	145	90.6		9.1	10.1	9
A—c	145	75.4		4.0	5.3	13

3.2 特细砂混凝土的主要物理性能:

① 收缩: 我们的研究结果如表 6。

特细砂混凝土的收缩

表 6

组别	Z	Z	A—a	A—b	A—c
龄期 (天)	530	530	464	464	464
平均收缩 ($\times 10^{-4}$)	1.053	1.020	2.120	3.013	3.460

国内外有关粗、中砂混凝土的收缩值, 一般龄期为 180 天的收缩值在 $(2 \sim 8) \times 10^{-4}$ 范围内, 可见认为特细砂混凝土的收缩比粗、中砂混凝土大的论据, 并不充分。

② 徐变: 特细砂混凝土的徐变, 强度等级为 $C_{30} \sim C_{40}$ 级的特细砂混凝土的徐变度 $C_{180} = 59.2 \times 10^{-6} \text{Mpa}^{-1}$, 徐变系数 $\phi_{180} = 2.16$, 而国内相同强度等级的中砂混凝土其徐变度 $C_{180} = (45.7 \sim 67.5) \times 10^{-6} \text{Mpa}^{-1}$, $\phi_{180} = 1.44 \sim 3.60$, 由此可以证明特细砂混凝土的徐变并不比中砂混凝土大。

③ 抗渗性: 水压加至 4.4Mpa 维持 8 小时无渗透现象, 后用煤油代水进行加至 4.0Mpa, 抗渗试验仪的管道接头处发生渗漏, 而试件仍未渗透。

④ 抗冻性: 我们采用 $4 \times 4 \times 6 \text{cm}$ 的小试件, 在 $-30^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ 冻融循环 50 次, 试件完

件好重量无损失。根据蔡正咏著的“混凝土性能”一书介绍,这种试验方法50次冻融循环相当于标准试件冻融循环350~500次。说明抗冻性良好。

4. 微观检测

(1) 孔结构测试: 普通砼的体积孔隙率,一般不小于8~10%,我们对特细砂砼进行孔结构测试结果见表7,其总孔隙率比一般砼小。如Z组340天的总孔隙率为0.035ml/g,相当于砼体积孔隙率2.7%。A—a、A—b组270天的总孔隙率分别为0.01614ml/g, 0.01320ml/g,折合为砼体积孔隙率相应为4.0%, 3.3%。在孔径分布中无害和少害孔占总孔隙率的69~87%,有害孔和多害孔仅占少数。

特细砂孔结构

表 7

组别	龄期 (天)	总孔隙率 (ml/g)	孔 分 布 (%)				抗压强度 (Mpa)	抗弯曲强度 (mpa)
			$(4-11) \times 10^3 \text{ nm}$	$10^3 \sim 10^2 \text{ nm}$	$10^2 \sim 10^1 \text{ nm}$	$10 \sim 3.7 \text{ nm}$		
Z	340	0.01085 (2.7%)	6.5	24.1	28.2	41.0	91.5	9.87
A—a	270	0.01614 (4.0%)	7.3	14.7	59.9	16.9	91.0	9.04
A—b	270	0.01320 (3.3%)	3.5	9.6	70.6	16.2	90.6	9.74

注: 表内括号内%代表砼体积孔隙率。

从A—a和Z组砼孔径分布微分曲线上的峰值对应最可见孔径 270 天为 186A, 340 天为 74A, 均属无害孔, 如图1、2。

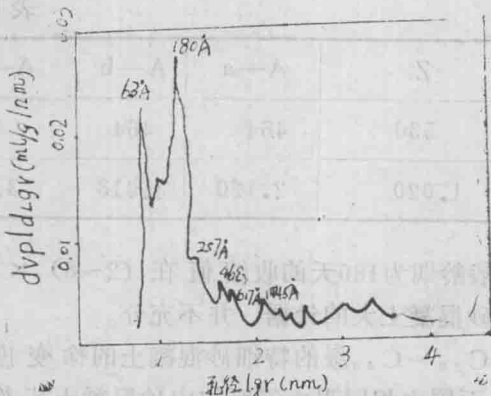


图1. A—a组混凝土龄期270天的分佈

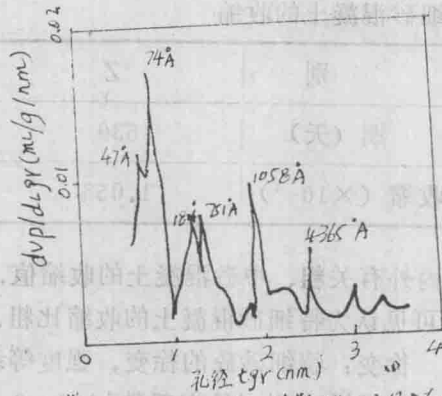


图2. Z组混凝土龄期340天分佈

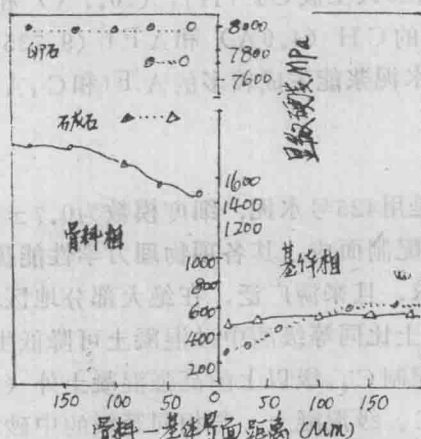


图3 石灰石与卵石骨料同水泥石界面显微硬度曲线

压害(2)集料与水泥石界面区显微硬度测试: 配比相同而集料不同, 石灰石集料的显微硬度值为1420Mpa, 卵石为7940Mpa, 图3石灰石与水泥界面各区的硬度值为440Mpa, 卵石为245Mpa, 为石灰石集料的56%。集料与界面的显微硬度值的差值卵石为7695Mpa, 石灰石集料980Mpa, 约为前者的13%, 说明石灰石集料与水泥石界面区结构变化梯度小, 不易产生应力集中变形严重的不协调现象。

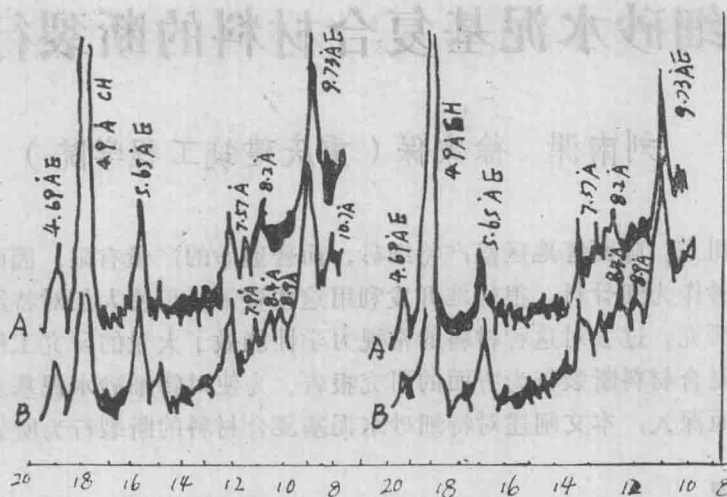


图5 水泥浆3天龄期射线衍射图 图6 水泥浆7天龄期射线衍射图

注 A组为掺有15%石膏粉末的水泥砂浆。
B组为净水泥浆

图5(3) XRD分析: 从图5, 图6的XRD分析结果, A组试样3天和7天即生成C₃A

CH, 和 $C_4A \cdot CH$ 其特征峰分别为8.2Å和7.57Å, 在B组试样中没有这些化合物出现, 而发现 $CA \cdot SH$ 和 CAH_{13} , 在3天生成 $C_4A \cdot H_{13}$ (10.7Å) 和 $B-C_4A \cdot H_{13}$ (7.9Å) 7天有 $C_4A \cdot SH_{12}$ 存在, A组3天的CH (4.9Å) 和 AFt (9.735Å) (5.65Å) 的数量均高于B组, 说明掺石灰石粉末的水泥浆能生成较多的 AFt 和 $C_4A \cdot CH_{12}$ 。

5、结束语:

(1) 特细砂优质混凝土是用425号水泥, 细度模数为0.7±的特细砂和粒径小于20mm的石灰石碎石加这量的减水剂配制而成, 其各项物理力学性能优良。

(2) 其原材料无特殊要求, 且来源广泛, 在绝大部分地区都能就地取材, 成本低, 在重庆地区每立方米特细砂混凝土比同等级的中砂混凝土可降低生产成本25%。

(3) 特细砂混凝土除能配制 C_{60} 级以上的高强混凝土外 (每立方米混凝土水泥用量接近500千克), 对配制 $C_{20} \sim C_{40}$ 级混凝土, 与同等级的中砂混凝土相比, 水泥用量还可节约60kg/m³以上。

(4) 这种混凝土最适宜用强制拌和机生产, 以便将裂而未断的针片状颗粒断开, 并可成团细颗粒分散, 有利于进一步提高其性能。

(5) 从微观检测结果证明了这种混凝土界面硬度大, (强度高), 结构密实, 有害孔少, 其水化产物有 $C_4A \cdot CH_{12}$ 和 AFt 长期稳定存在。这是这种混凝土各项性能优越的原因。

特细砂水泥基复合材料的断裂行为

刘南渊 徐家保 (重庆建筑工程学院)

我国重庆、川东、陇西等地区盛产特细砂, 而普通砂的产量有限, 因而在混凝土工程中广泛地使用特细砂作为细骨料。很好地开发利用这些资源, 促使人们对特细砂水泥基复合材料进行了大量的研究。过去对这种材料的常规力学性能做了大量的研究工作, 但还难见到有关特细砂水泥基复合材料断裂行为方面的研究报告。为使对特细砂水泥基复合材料力学行为的认识更为全面而深入, 本文阐述对特细砂水泥基复合材料的断裂行为所做的研究成果。

一、试验情况

(一) 试验的原理

试验采用缓慢三点弯曲法。其基本原理是能量平衡, 即在稳定载荷下, 载荷所作功可认为几乎全部转化为断裂表面能。这种方法的物理意义明确, 操作简便, 精确度高; 为国内外研究混凝土的断裂行为者广泛采用 (参阅本刊83年第6期叶枝荣一文)。缓慢弯曲法的关键是使材料以稳定方式断裂, 以求得完整、连续的荷载挠度曲线。这要求: (1) 试验机的刚

度足够大，使它所储存的弹性能量尽量小；（2）弯曲试件切口要达到一定深度，使总断裂功减小，以产生稳定断裂；（3）加荷速度足够慢，使系统所储存的能量“来得及”连续转化为断裂表面能。

用缓慢弯曲法能够测得稳定的全应力—应变曲线（如图1），由此曲线所包围的面积可求得重要参数断裂表面能 r_{fo} 其断裂表面能 r_s 由下式求得：

$$r_s = \left[\int_0^{\delta_{\max}} f(\delta) d\delta + \frac{1}{2} mg \delta_{\max} \right] / 2 (d-a) b$$

式中 d, a, b ——尺寸符号（见图2）； $\int_0^{\delta_{\max}} f(\delta) d\delta$ ——载荷所作功； $\frac{1}{2} mg \delta_{\max}$ ——重力所作功； g ——梁的质量； g ——重力加速度。

断裂韧性 K_{Ic} 由下式求得

$$K_{Ic} = \sigma_c \sqrt{a} f\left(\frac{a}{b}\right)$$

式中 $\sigma_c = \frac{3P_{\max} l}{2bd^2}$ ；

$$f\left(\frac{a}{d}\right) = 1.93 - 3.07\left(\frac{a}{d}\right) + 14.53\left(\frac{a}{d}\right)^2 - 25.11\left(\frac{a}{d}\right)^3 + 25.8\left(\frac{a}{d}\right)^4;$$

$P_{\max}$ ——极限荷载；

a, b, d ——尺寸符号，见图2。

对断裂行为的认识仅局限于断裂参数的测定是不够的。本实验在三点弯曲试验中使用了声发射仪，对试件切口的尖端前沿的裂纹引发与开展，进行了监测，以了解断裂行为的全过程。

整个断裂行为测试示意图如图3与图4所示。

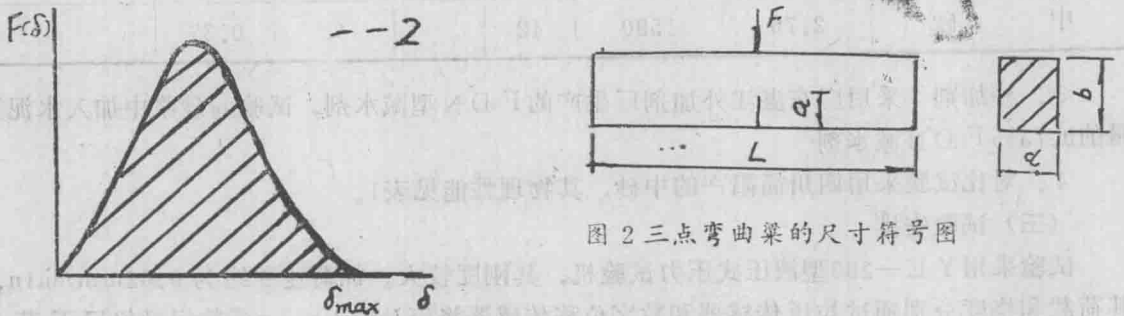


图2 三点弯曲梁的尺寸符号图

图1由稳定的三点弯曲试验得出的全应力应变曲线

（二）试验材料

0.1. 特细砂 均采用重庆特细砂，经X射线衍射鉴定，其主要矿物组成为石英。主要物理性能见表1。



图3 声发射仪工作
原理框图

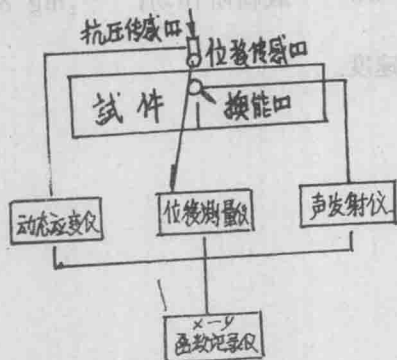


图4 断裂行为测试工作原理框图

2. 水泥 试验采用的水泥均为单批购回的重庆水泥厂生产的525号普通硅酸盐水泥。

特细砂与中砂的物理性能

表1

试验内容 试验结果	比重 (g/cm ³)	容重 (kg/m ³)	空隙率 (%)	含泥率 (%)	细度模量	平均粒径 (mm)	吸水率 (%)
特细砂	2.66	1284	51.7	2.1	0.718	0.157	1.55
中砂	2.70	1590	42			0.37	

3. 外加剂 采用广东湛江外加剂厂生产的F D N型减水剂, 试验的砂浆中加入水泥重量的0.75% F D N减水剂。

4. 对比试验采用四川简阳产的中砂, 其物理性能见表1。

(三) 试验安排

试验采用Y E—200型液压式压力试验机, 其刚度较大。加荷速度约为0.02mm/min, 其荷载和挠度分别通过拉压传感器和数字位移传感器将信号输入x—y函数记录仪记下荷载—挠度曲线, 同时也记下声发射率—挠度曲线。

选用的试件尺寸为41.5×5×10cm, 切口采用预制式, 即成型时在试件中部插入一铜片, 待终凝后取出铜片即形成预制裂纹。切口深度为梁的半高。试件分别采用S E C (水泥裹砂工艺) 和Ord (普通工艺) 制得S S E C砂浆和S S O砂浆。试件成型后一天脱模, 然后送养护室标准养护28天后进行实验, 测试了W/C为0.40、0.38, 砂灰比S/C为1.0、1.5的特细砂砂浆和中砂砂浆试件 (共10组) 的断裂表面能和断裂韧性。

二、试验结果与讨论

全部试验结果列于表2。所列的结果都是三块试件的平均值。全应力—应变曲线、声发射图谱示意图6所示。

试验结果表明：

1. 特细砂砂浆的断裂面表面能 r_f 约为 $14\sim 24\text{J}/\text{m}^2$ ，断裂韧性约为 $14\sim 21\text{N}\cdot\text{mm}^{-3/2}$ ；
2. 特细砂与中砂砂浆的断裂韧性比较接近，似乎各自都有一个最佳值区域；
3. 特细砂砂浆的最大变形位移小于中砂砂浆；
4. SSEO砂浆较SSO砂浆的断裂表面能 r_f 提高约11%，断裂韧性 K_{IC} 提高约12%。

通过对声发射图谱和全应力—应变曲线的分析，发现在断裂过程中存在两个很有意义的临界点，即 P_c 与 P_b （图6）。

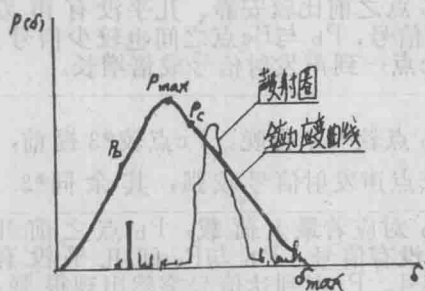


图6 全应力应变曲线及声发射图谱

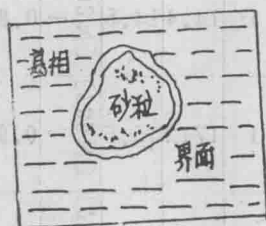


图7 单一砂粒模型示意图

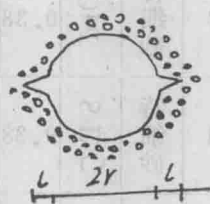


图8 基相中的含缺口柱状圆孔示意图

（一）断裂过程中的两个临界点

1. 临界点 P_c

按声发射图谱似可将砂浆的断裂过程分为二个阶段。 P_c 点之前为裂纹的稳定开裂阶段， P_c 点之后的一个阶段为主裂纹失稳扩展阶段。对于划分两个阶段的临界点 P_c 的确定，各家持说不一，都有其自己的试验依据。有些研究者认为 P_c 点是在应力—应变曲线的上升分枝，而我们通过同步的声发射监测结果表明 P_c 点是在曲线的下降分枝，其值在极限荷载的76~90%之间。作者认为有些文献报道的 P_c 点出现在上升分枝的原因，可能是试验机的刚度较小或者因采用等加荷速率加荷且加荷速度较快，未能反映出混凝土的真正破坏过程。J. A. Hudson曾指出：在材料试验中，长期以来将力作为独立变量，用等加荷速率进行力学试验达到应力—应变曲线的峰值时，不可避免地产生猛烈的失去控制的破坏；如果将位移作为独立变量，在刚性或有反馈控制系统的试验机中，可以实现等位移速率，这样就可以控制破坏。

对应于材料的不同组成和结构， P_c 点出现的位置不同。特细砂的颗粒较小，其砂浆的匀质性较中砂砂浆为好。试验结果表明特细砂砂浆较中砂砂浆的 P_c 点提早出现（数值较大）。试验还表现SSEC砂浆较SSO砂浆的力学性能有明显的改善。

特细砂及中砂砂浆的断裂行为测试结果汇总表

表2

房号	砂型	工 艺	W/C	S/C	K_{Ic} ($N \cdot mm^{3/2}$)	f_t ($J \cdot m^{-2}$)	P_b * P_{max} (N)	P_c	δ_{max} (mm)	声发射图谱主要特点	
1	特细砂	Ord	0.40	1	16.5	16.2	[664N] 1	0.40	0.83	0.28	P_c 点之前一直有零星、微弱的声发射信号, bc段有较密但较弱的声发射信号, 到 P_c 点声发射率突增且峰值不回到门槛值。
2	特细砂	SEC	0.40	1	17.4	18.4	[727N] 1	0.42	0.84	0.35	P_D 点到来较*1晚一些, P_c 到来较前者提前。其余同*1。
3	特细砂	Ord	0.38	1	14.4	14.5	[602N] 1	0.86	0.88	0.28	P_b 点之前比较安静, 几乎没有声发射信号, P_b 与 P_c 点之间也较少信号。 P_c 点一到声发射信号成倍增长。
4	特细砂	SEC	0.38	1	17.2	15.5	[739N] 1	0.93	0.90	0.27	P_b 点较*3来得晚。 P_c 点较*3提前, P_c 点声发射信号较强, 其余同*3。
5	特细砂	Ord	0.38	1.5	17.6	22.5	[759N] 1	1	0.86	0.35	P_b 对应着最大荷载, P_b 点之前几乎没有信号。 P_b 与 P_c 间几乎没有信号。 P_c 点到达信号突然出现很强, 且不回到门槛值。
6	特细砂	SEC	0.38	1.5	20.7	24.0	[895N] 1		0.91	0.28	几乎没有明确的 P_b 点, P_c 点以前很安静, P_c 点较5*提前, 其余同5*。
7	中砂	Ord	0.38	1	15.5	19.2	[669N] 1	0.90	0.79	0.38	P_b 点很明显, 之前没有信号, P_b 与 P_c 间信号较多, P_c 点以后声发射信号持续较强一段时间, 表现出很稳定。
8	中砂	SEC	0.38	1	20.3	29.6	[849N] 1	1	0.86	0.46	P_b 点较*7滞后且对应着最大荷载, P_b 与 P_c 间较短较安静。 P_c 点到来有很强信号, 其余同前。
9	中砂	Ord	0.38	1.5	16.0	17.7	[702N] 1		0.85	0.37	P_b 点几乎超过了极限荷载, P_b 与 P_c 间有一些较弱的信号, P_c 点以后信号增大且较密集。
10	中砂	SEC	0.38	1.5	17.7	21.1	[782N] 1		0.76	0.35	没有明显的 P_b 点。 P_c 点滞后*9, 声发射信号在 P_c 点突然变得很强, P_c 点之前较安静。

* P_{max} 表示以极限荷载(括号内的值)为1, P_b 与 P_c 分别为该点荷载与极限荷载的比值。

由此, 可认为点在一定程度上反映了材料的匀质性程度。

2. 临界点 P_b

从声发射图谱看, P_b 对应的声发射有一突变, 如果 P_b 之前没有声发射信号, 到 P_b 点

开始出现信号, 很多情况就是这样。如果 P_b 之前有微弱而零星的信号, 则 P_b 点开始出现一较强的信号。 P_b 的出现与材料的组成和结构似乎有一定的关系。 P_b 的出现, 意味着有可能是四种情况: ①主裂纹扩展或者主裂纹亚临界扩展; ②基相裂纹引发, 但与骨料无关; ③砂粒被断开, 因而形成基相裂纹; ④界面裂纹扩展致基相裂纹的引发 (参阅图 9 模型)。

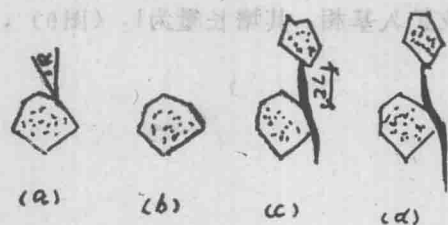


图 9 起源于界面的裂纹生长过程示意图

- (a) 从界面开始的裂纹扩展示意图;
- (a) → (b) 沿界面以不稳定的方式形成初始裂纹;
- (c) 稳定的支裂纹穿过基体;
- (c) → (d) 扩展中的裂纹遇到其它包骨料;

上述情况①主裂纹达到临界点开始扩展显著是不可能的, 因为 P_c 点明显地表示了主裂纹的起始扩展。又因为 P_b 与 P_c 点之间没有声发射信号, 主裂纹的亚临界扩展也是不可能的。如果情况②成立, 则对 P_b 点随砂的粒径增大而滞后出现的试验现象无法解释。无论是特细砂还是中砂, 其刚度总是大于基相的刚度, 裂纹扩展不可能取得骨料劈开、能量消耗较大的途途, 因而情况③也不可能成立。通过对试验资料反复仔细分析, 发现工艺方法和砂的类型影响着 P_b 的出现, 意味着 P_b 是与界面结构和砂粒几何尺寸有关的一种物理现象。这种现象只有用情况④才能作出合理的解释。也就是说, P_b 点的物理意义是砂粒与水泥浆体的界面裂纹扩展而引发基相出现微裂纹的临界点。

P_b 点一般出现在全应力—应变曲线的上升段, 多在极限荷载的40%以后出现。 P_b 点出现位置受材料的组成和结构影响, 其范围较宽。特细砂的颗粒按平均粒径值计算得的体积仅为中砂的平均颗粒体积的十分之一左右。用拓扑地貌学的观点看, 断裂的实际表面是很不平整的, 是一个极其复杂的三维现象。因此特细砂粒的阻裂作用应比中砂颗粒的阻裂作用小。试验结果表明, 特细砂砂浆的 P_b 点较中砂砂浆的 P_b 点提前出现。试验还表明, SSEC砂浆由于界面结构得到改善, 它们的 P_b 点较SSO砂浆的 P_b 点都有不同程度上的推迟出现。这表明 P_b 点出现的迟早, 取决于砂粒的阻裂作用和界面结构的影响, 它直观地反映出界面结构、砂粒大小对裂纹扩展的阻裂作用。似乎可以认为 P_b 点相对反映了材料的阻裂能力。

(二) 裂纹的扩展

在通常气候条件下, 硬化水泥浆体、砂浆或混凝土在承受荷载之前已存在大量微裂纹, 这些裂纹产生的原因各不相同。

当砂浆试体负荷后, 裂纹首先从砂粒和基相的界面上引发。大量研究已确认界面存在着薄弱的过渡环, 界面过渡环的 K_{Ic} 值较基相和砂粒各自的 K_{Ic} 值都低, 因此界面过渡环是裂纹首先选择的扩展途径。当上述亚微裂纹在扩展过程中被应力集中效应较低的区域所捕获, 亦即遇到局部势垒 (例如砂粒——刚性的包体) 两停顿, 只有提高外应力才得以继续扩展。于是就表现出裂纹扩展的非连续性。这可直观地从声发射图谱上明显地看出。

假设在多孔基体中含有一个园柱形预裂纹 $2r$ 的情况 (图 8) 下, 一旦压应力 q 在某一取向达到了临界值, 裂纹就发生稳态扩展。这里, 应力 q 的临界值 q_c 是

$$q_c = \sqrt{\frac{\pi E \gamma_f}{2 \gamma}} \cdot \sqrt{\frac{(1+\lambda)^7}{(1+\lambda)^2 - 1}}$$

式中 $\lambda = \frac{L}{\gamma}$;

γ_f ——断裂表面能;

E ——弹性模量。

在应力 q_c 作用下,一个原始长度为 $2l_1$ 的裂纹分两支扩入基相,其增长量为 l_2 (图9),得到关系式

$$q_c = \frac{K_{Ic}}{A(\alpha, \rho)} \cdot \frac{1}{2l_1} \sqrt{\pi l_2}$$

式中 $A(\alpha, \rho) = \sin^2 \alpha \cos \alpha - \rho \sin^3 \alpha$;

α ——原始裂纹面与应力轴夹角;

ρ ——原始裂纹面的摩擦系数。

当裂纹扩展至第二个骨料时,裂纹是否会进一步扩展,视第一个和第二界面的倾角 β 而定。骨料对裂纹的扩展有明显的干挠和阻滞作用。上面的描述实际上是不够确切的。不过它可以给出一个定性认识的概念。

上述微裂纹引发、扩展过程中必须伴随有声发射现象。如果微裂纹大量引发和扩展,相应声发射信号就强。从我们的试验来看,这一阶段除 P_b 点外,声发射一般都不明显。其原因可能有两个:其一,微裂纹引发和扩展数量级很低。其二,试验接收的声发射信息灵敏度不够高,未能将很小的信号接收下来。 bc 段有间断的声发射,说明此阶段可能有基相微裂纹引发扩展。

随着荷载不断增大,初始离散的裂纹相互作用而形成一个亚稳的微裂纹带,一旦应变能释率 G 达到其临界 G_{Ic} ,即 $G \geq G_{Ic}$ 时,主裂纹起裂、失稳扩展,它们互相贯通,最后导致材料整体的破坏,从声发射曲线可看出这一临界点 P_c 的到来对应着有很强很密的信号,一般在 P_c 附近不再回到门槛值,这直观地表现为主裂纹失稳扩展的情形。

(三) 特细砂对其砂浆断裂行为的影响

水泥石、砂浆,混凝土从本质上说都是非匀质系统,这个系统在加荷以前由于成型、化学变化,温度与湿度梯度,已有为数不少的缺陷、孔隙和微裂纹。普通砂的砂浆基材相对较软,而骨料则是刚性包体。特细砂加入水泥浆体中使其基相具有更大的刚性。由于它们的存在对于水分的转移和裂纹的扩展起着抑制阻挡作用,减小和缓和了开裂,降低了尺寸不稳定性。这是骨料在基相中的有利作用。其有较大刚性的特细砂本来是可以有阻止裂纹的能力,但是它们的存在却在水泥浆体中形成了不连续性和非均匀性。由于砂子颗粒的存在,使原来可以认为近似匀质的水泥浆体中产生了薄弱的界面过渡环,故在应力较低时,裂纹首先从过渡环引发。另外,砂浆颗粒在基相中的楔劈作用产生了内部的应变梯度,在界面上相应出现应变集中现象。上述的不均匀性、过渡环结构、非弹性应变的分布情况都不同程度地对特细砂浆的断裂行为起着不利的影响。以上所述,是特细砂在水泥基相中的双重性。

当特细砂及其体积含量在特细砂砂浆中表现出有利作用时,相应的不利作用就显得不重要了,反之亦然。特细砂平均粒径与体积较中砂小很多,所以特细砂的阻裂作用不及中砂。因此在一定条件下特细砂砂浆较中砂砂浆的断面表面能要低一些。当特细砂在砂浆中的体积含量增加时,它的阻裂作用也随之增大,相应的断裂表面能增加。试验结果正是如此。但中