

# 二滩水电站四级配砼试验研究

杨成球 吴政

(成都勘测设计研究院科研所)

**提 要** 本文针对二滩水电站全级配与湿筛的正长岩和玄武岩砼,进行了掺外加剂砼拌和物及硬化后的容重测定,含气量和风化骨料对砼的强度影响、力学性能、压汞测孔和气泡测定等试验研究。试验结果表明:联合掺用减水剂和引气剂,采用高频振捣,可明显提高砼的基本力学性能;正长岩砼的抗裂性能明显优于玄武岩混凝土。

**关键词** 全级配砼 最大骨料粒径 含气量 微观分析 压汞测孔 气泡测定

## 一、引 言

二滩水电站位于雅砻江下游四川省攀枝花市,以发电为主的综合水电枢纽工程。电站装机330万kW,拦河大坝为砼双曲拱坝,最大坝高为240m,砼方量420万 $m^3$ 。

大坝砼的最大骨料粒径为150mm,过去室内砼试验大多是采用湿筛法进行的,使砼本身的组成发生了较大的改变,因而砼相应的特性也产生了改变。为了评定砼的真实特性,采用了包含砼的全部配料,相应的试件最小线性尺寸应等于或大于最大骨料粒径3倍,确定抗压及劈裂抗拉强度试件为45cm $\times$ 45cm $\times$ 45cm,受压弹性模量试件为 $\phi$ 45cm $\times$ 90cm,进行了不同骨料类别掺粉煤灰及外加剂的四级配砼有关特性试验研究。

## 二、试验研究条件

### (一)试验原材料

采用峨眉525<sup>#</sup>硅酸盐大坝水泥,28d龄期标号检验为57.0MPa。粉煤灰采用攀枝花市河口电厂磨细灰,0.08mm方孔筛余为7.6%,需水量比为100%。骨料采用坝区附近正长岩和玄武岩人工粗细骨料,其中正长岩比重为2.72,玄武岩比重为2.94,正长岩和玄武岩的细度模数分别为2.78和2.90。粗骨料的级配为:小石:中石:大石:特大石=0.20:0.20:0.25:0.35。

由于二滩水电站砼采用人工粗细骨料,为了提高砼的和易性和节约水泥,试验时掺用了吉林开山屯木钙和四川邛崃引气剂。

### (二)劈裂抗拉试验垫条尺寸确定

由于全级配砼试件为非标准试件,对于边长45cm立方体试件,其劈裂抗拉试件的垫条宽度按模型试验相似理论应为15mm;边长20cm立方体试件垫条宽度应为6.7mm(与边长15cm立方体标准试件垫条宽度为5mm相对应)。按平面问题有限元法,对边长15cm立方体5mm宽垫条;边长45cm立方体5、10、15、18mm宽的垫条分别进行了计算。计算结果表明,对于边长45cm立方体试件,当垫条宽度大于或小于15mm,同边长15cm立方体试件5mm宽的

垫条相比,其劈裂面上的应力会滞后或提前进入塑性状态和破坏。唯有 15mm 的垫条宽度,其劈裂面上各点在各个不同加载步时均与标准试件有极好的同步性。与此同时,我们还进行了简要的对比试验,其试验结果列于表 1,且试验成果与计算结果吻合。

通过上述计算与试验验证,对于非标准劈裂抗拉试件,边长 45cm 立方体试件选用垫条宽度为 15mm;边长 20cm 立方体试件选用垫条宽度为 6.7mm。

### (三)试验研究内容

进行了全级配砼拌和物及硬化后容重的测定,不同龄期的抗压强度、劈裂抗拉强度、受压弹性模量以及微观、亚微观孔隙检测等项目的试验。同时还按常规方法进行了相应湿筛砼有关项目的试验以及风化骨料对砼强度影响的研究。

砼试验按照《水工砼试验规程 SD105-82》进行,其中全级配砼成型除注明者外均采用高频插入式振捣器振实。试验砼配合比列于表 2。

表 2 试验砼配合比表

编号	配合比 胶材:砂:石:水	每 m <sup>3</sup> 材料用量(kg)					木钙掺量 (%)	引气剂掺量 (1/万)	实测陷度 (cm)	实测含气 量(%)
		水	水泥	粉煤灰	砂	石				
E <sub>25</sub>	1:1.88:6.50:0.42	105	175	75	469	1626	0.2	0.45	3.3	3.9
E <sub>26</sub>	1:2.07:6.97:0.45	105	163.3	70	483	1627	0.2	0.50	5.5	4.3
E <sub>27</sub>	1:2.31:7.38:0.49	107	152.9	65.5	505	1612	0.2	0.55	3.9	4.3
E <sub>28</sub>	1:2.57:7.76:0.53	109	144.0	61.7	528	1596	0.2	0.55	4.4	4.8
E <sub>30</sub>	1:2.24:7.54:0.45	105	163.3	70.0	522	1759	0.2	0.50	5.4	3.7
E <sub>31</sub>	1:2.50:7.98:0.49	107	152.9	65.5	547	1743	0.2	0.55	5.0	3.1
E <sub>32</sub>	1:2.78:8.39:0.53	109	144.0	61.7	571	1725	0.2	0.57	4.5	3.3
E <sub>33</sub>	1:3.09:8.85:0.57	110	135.1	57.9	596	1709	0.2	0.65	5.1	3.5
E <sub>34</sub>	1:2.08:6.65:0.45	108	168.0	72.0	500	1595	0.25	/	4.2	2.1
E <sub>35</sub>	1:2.16:6.89:0.45	106	164.9	70.7	509	1623	0.2	0.25	3.5	3.2
E <sub>36</sub>	1:2.06:6.97:0.45	104	161.8	69.3	477	1610	0.2	0.65	5.4	5.8
E <sub>37</sub>	1:2.65:7.60:0.53	112	148.0	63.4	560	1605	0.25	/	4.2	1.9
E <sub>38</sub>	1:2.67:7.67:0.53	110	145.2	62.3	555	1591	0.2	0.25	4.7	3.0
E <sub>39</sub>	1:2.55:7.69:0.53	108	142.0	61.1	519	1569	0.2	0.70	5.4	6.5
E <sub>40</sub>	1:2.07:6.97:0.45	105	163.3	70.0	483	1627	0.2	0.50	4.5	4.8
E <sub>41</sub>	1:2.07:6.97:0.45	105	163.3	70.0	483	1627	0.2	0.50	5.2	4.8
E <sub>42</sub>	1:2.57:7.76:0.53	109	144.0	61.7	528	1596	0.2	0.55	5.8	5.7
E <sub>43</sub>	1:2.63:7.93:0.53	107	141.3	60.6	530	1602	0.2	0.55	5.2	5.8
E <sub>46</sub>	1:2.24:7.16:0.49	112	160.0	68.6	513	1636	0.2	/	4.2	1.6

注: E<sub>30</sub>~E<sub>33</sub>为玄武岩砼,其余为正长岩砼。

## 三、试验成果及分析

### (一)容重试验

进行了砼拌和物及硬化后的容重试验。为了提高试验精度,硬化砼的容重测定采用排水

法。试验成果列于表 3。从表中可以看出,全级配玄武岩砷的容重较正长岩的大 9.5%左右,湿筛后的玄武岩砷则较湿筛后正长岩砷的容重大约 10.2%,这是因为玄武岩骨料比重较正长岩的大,且正长岩含气量稍高,对于湿筛砷影响较大之故。

(二) 砷中含气量对强度的影响。

从所周知,砷中的含气量对其强度有较大的影响。为此,对正长岩砷进行了两组不同含气量对抗压强度及弹性模量影响的试验,试验结果列于表 4。附图绘出了砷不同含气量与抗压强度关系曲线。从附图及表 4 中可以看出,当砷中的含气量超过 3.5%后,其抗压强度明显下降,弹性模量也有所降低。当含气量大于 4%时,砷的抗压强度损失更为明显。这

里应说明一点的是,由于试验砷本身的水泥用量很低,且又用粉煤灰等量取代了 30%的水泥,故砷中含气量增加对其强度减少的影响较普通砷更为显著。

(三) 风化骨料对砷强度的影响

将正长岩砷中掺不同量的微风化骨料

进行抗压及劈裂抗拉强度试验,试验结果列于表 5。从表中可以看出风化骨料对早龄期砷抗压强度影响不大,但对抗拉强度及一年龄期砷抗压强度的影响是不容忽视的。在两个水胶比中当风化骨料含量为 12%时,其 180d 龄期抗拉强度分别降低 14%和 18%。风化骨料含量 30%时,其 180d 龄期抗拉强度降低 18%和 25%,其一年龄期抗压强度降低近 15%。这是因为风化骨料表面有层淡黄色的风化物,影响了砷中浆体与骨料间的粘结力所致。同时因为风化骨料本身的抗压强度相对于高标号砷的强度来说富余不多,在低龄期时由于水泥浆体弹性模量低(尽管砷本身弹性模量也较高),便于应力重分配。故风化骨料对高标号、高龄期砷抗压强度也有影响。如果采用风化较严重的骨料时,对砷抗拉及抗压强度的影响将会更大。

表 3 砷实测容重(10<sup>4</sup>N/m<sup>3</sup>)

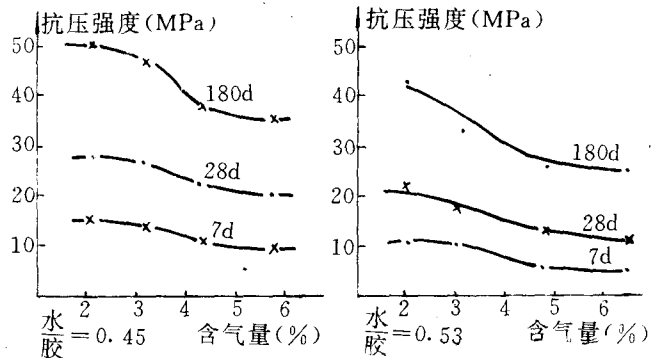
试验编号	骨料种类	砷拌和物		硬化砷试件(cm)			
				45×45×45		20×20×20	
		实测值	平均值	实测值	平均值	实测值	平均值
E <sub>26</sub>	正长岩	2.417	2.410	(2.489)	(2.474)	2.394	2.380
E <sub>27</sub>		2.412		(2.485)		2.398	
E <sub>28</sub>		2.401		(2.447)		2.349	
E <sub>16</sub>		2.489		(2.515)		2.458	
E <sub>30</sub>	玄武岩	2.681	2.644	(2.726)	(2.702)	2.634	2.620
E <sub>31</sub>		(2.706)		(2.658)		2.604	
E <sub>32</sub>		2.612		(2.673)		2.622	
		2.640		(2.706)			

注:括号内数值为振捣棒振实砷,基余为振动台振实砷

表 4 砷不同含气量试验成果

编号	水灰比	每 m <sup>3</sup> 材料用量(kg)					木钙掺量(%)	微沫剂掺量(%)	实测含气量(%)	抗压强度(MPa)	受压弹数(10 <sup>4</sup> MPa)						
		水	水泥	粉煤灰	砂	石					7d	28d	180d	1年			
														28d	180d	360d	
E <sub>31</sub>	0.45	108	168.0	72.0	500	1595	0.25	/	4.2	2.1	15.4	27.2	38.5	50.4	52.3	23.1	73.4
E <sub>35</sub>		106	164.9	70.7	509	1623	0.20	0.25	3.5	3.2	14.5	27.7	37.6	44.8	62.3	43.0	83.4
E <sub>26</sub>		105	163.3	70.0	483	1627	0.20	0.50	5.5	4.3	11.6	23.3	33.9	44.7	82.1	33.0	73.2
E <sub>36</sub>		104	161.8	69.3	477	1610	0.20	0.65	5.4	5.8	10.4	22.8	33.5	43.6	82.1	18.2	84.3
E <sub>37</sub>	0.53	112	147.9	63.4	560	1605	0.25	/	4.2	2.0	11.1	22.2	33.3	24.3			
E <sub>38</sub>		110	145.3	62.2	555	1591	0.20	0.25	4.7	3.0	10.7	18.0	30.8	33.4			
E <sub>28</sub>		109	144.0	61.7	528	1596	0.20	0.55	4.4	4.8	6.4	13.8	21.2	22.6			
E <sub>39</sub>		108	142.7	61.1	519	1568	0.20	0.70	5.4	6.5	6.3	12.2	21.2	25.6			

注:1.采用正长岩骨料四级配混凝土 2.抗压试件尺寸为 20cm×20cm×20cm,受压弹模试件尺寸为 415cm×30cm。



附图 砷含气量与抗压强度关系曲线

(四)力学性能试验

表5 掺风化骨料试验结果

编号	骨料种类	水胶比	风化骨料掺量(%)	抗压强度(MPa)				劈裂抗拉强度(MPa)			
				7d	28d	180d	365d	28d	180d	365d	
E <sub>25</sub>			0	11.6	23.1	39.9	44.8	50.8	/	/	/
E <sub>10</sub>	正长岩	0.45	12	12.0	22.1	37.4	40.3	49.3	81	/	/
E <sub>11</sub>			30	11.3	21.3	36.0	39.4	41.8	62	/	/
E <sub>28</sub>			0	6.8	13.8	26.1	34.3	31.3	30.2	57	3.09
E <sub>12</sub>	岩	0.53	12	6.8	13.1	25.8	29.8	31.1	15	2.11	/
E <sub>13</sub>			30	7.1	13.1	25.9	29.4	31.0	71	1.94	/

注:试件尺寸为20cm×20cm×20cm

全级配大试件及湿筛小试件的有关力学特性试验成果列于表6。从表6中可以看出,单掺木钙的全级配砼(E<sub>45</sub>)28d、180d龄期的抗压强度与湿筛小试件同一龄期的抗压强度比值分别为0.88和0.81。这与文献[2]提出的比值0.86基本相同。但是联合掺用木钙与引气剂的砼则例外,其全级配大试件早龄期的抗压强度反而较小试件高,且大小试件抗压强度的比值随着试验龄期的增长而减小。从表6中还可看出,联合掺用木钙与引气剂大试件的抗压强度与单掺木钙的基本相同,但湿筛小试件的抗压强度前者则低得多。这是因为全级配砼中40mm以上粗骨料占砼体积近40%,因此全级配砼的实际含气量较实测含气量(剔除40mm以上粗骨料后的试验结果)减少约40%。其次是全级配砼采用插入式高频振动器(振动频率为11000次/min)振实,其消泡效果(特别是消除对抗压强度影响较大的粗气泡)优于普通标准振动台(振动频率3000次/min)。这可从表7和表3的试验结果得到了充分的验证。第三是在受压时全级配砼中粗骨料的骨架作用大于湿筛砼中的粗骨料,尤其在低龄期(7d),因其水泥浆体的弹性模量较低,试件受压时便于应力重分配,故其大小试件的比值更大。

表6 全级配砼试验成果表

试件编号	水胶比	木钙掺量(%)	微沫剂掺量(%)	陷度(cm)	含气量(%)	抗压强度(MPa)										全级配砼与湿筛砼抗压强度比				
						45×45×45(cm)					20×20×20(cm)					C <sub>15</sub> /C <sub>20</sub>				
						7d	28d	90d	180d	365d	7d	28d	90d	180d	365d	7d	28d	90d	180d	365d
E <sub>25</sub>	0.42	0.2	0.45	3.3	3.9	/	/	/	/	/	18.1	30.2	39.9	44.8	50.8	/	/	/	/	/
E <sub>26</sub>	0.45	0.2	0.50	5.5	4.3	14.2	24.3	33.1	42.7	45.7	11.6	23.1	30.3	39.0	47.8	1.22	1.05	1.09	1.09	0.96
E <sub>27</sub>	0.49	0.2	0.55	3.9	4.3	13.2	20.2	28.4	37.3	40.0	8.9	18.7	26.7	35.5	41.4	1.48	1.08	1.06	1.05	0.97
E <sub>28</sub>	0.53	0.2	0.55	4.4	4.8	11.8	17.9	24.0	29.8	31.7	6.8	13.8	21.2	26.1	34.3	1.74	1.30	1.13	1.14	0.97
E <sub>16</sub>	0.49	0.2	/	4.2	1.6	/	22.6	/	37.9	/	13.0	25.7	/	47.0	/	/	0.88	/	0.81	/
E <sub>30</sub>	0.45	0.2	0.50	5.4	3.7	/	21.3	/	40.5	/	12.6	20.8	33.5	41.0	44.4	/	1.02	/	0.99	/
E <sub>31</sub>	0.49	0.2	0.55	5.0	3.1	12.9	20.4	30.3	35.3	37.8	9.4	19.5	32.8	36.5	41.3	1.37	1.05	0.92	0.97	0.91
E <sub>32</sub>	0.53	0.2	0.57	4.5	3.3	/	20.2	/	34.1	/	8.8	17.9	28.5	33.1	36.4	/	1.13	/	1.03	/
E <sub>33</sub>	0.57	0.2	0.65	5.1	3.5	/	/	/	/	/	8.2	16.7	24.8	30.5	/	/	/	/	/	/
试件编号	劈裂抗拉强度(MPa)					受压弹模(10 <sup>4</sup> MPa)					轴向拉伸(MPa)									
	45×45×45(cm)		20×20×20(cm)			φ15×90(cm)		φ15×30(cm)			抗拉强度		极限拉伸(×10 <sup>-6</sup> )		拉伸变形模量(×10 <sup>4</sup> )					
	28d	180d	365d	28d	180d	365d	28d	90d	180d	365d	28d	90d	180d	365d	28d	180d	365d			
E <sub>25</sub>	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	2.48	2.99	3.11	3.54	2.61	3.25	3.40			
E <sub>26</sub>	1.89	2.92	3.11	2.44	3.29	3.66	2.67	3.06	3.39	3.72	1.32	1.65	1.73	2.03	2.49	3.15	3.20			
E <sub>27</sub>	1.45	2.84	2.96	1.57	3.11	3.48	2.59	2.98	3.26	3.31	0.92	1.57	1.72	1.99	2.28	2.84	3.04			
E <sub>28</sub>	1.18	2.35	2.58	1.30	2.57	3.03	2.54	2.93	3.33	3.09	0.95	1.45	1.71	2.01	1.97	/	/			
E <sub>16</sub>	/	/	/	2.10	/	/	2.63	2.99	3.25	/	2.17	2.78	3.23	/	/	/	/			
E <sub>30</sub>	1.74	2.85	/	1.83	3.47	3.56	3.53	3.80	4.14	4.26	3.51	3.63	4.24	4.23	3.18	3.93	3.96			
E <sub>31</sub>	1.61	2.71	3.05	1.67	3.26	3.37	3.53	3.63	3.94	3.96	1.01	1.33	1.39	1.71	2.95	3.87	3.81			
E <sub>32</sub>	1.53	2.61	/	1.66	2.87	3.03	2.96	3.40	3.73	3.88	0.59	1.03	1.48	1.83	2.92	3.59	3.72			
E <sub>33</sub>	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/			

注:1. E<sub>30</sub>~E<sub>33</sub>为玄武岩四级配砼,其余为正长岩四级配砼,2. 28d龄期边长为15cm立方体试件,E<sub>26</sub>,E<sub>27</sub>两组的抗压强度分别为23.9MPa和19.3MPa。与表中20cm试件的抗压强度的比值分别为1.04与1.07与有关规范1.05相近。

在此必须指出的是,掺引气剂全级配大试件砼的抗压强度一般较湿筛小试件的高,而两者的抗拉强度比值则相反(其大小试件的比值大多数在 0.80~0.95 之间)。这是因为在同样配合比及原材料前提下,对于贫水工砼来说,胶凝材料的用量是影响砼抗拉强度的主要因素。尽管全级配砼中的含气量较湿筛砼小,但因湿筛提高了其胶凝材料的相对用量,因而其抗拉强度反而较全级配砼高。其次是全级配砼中 40mm 以上粗骨料占粗骨料总重量的 60%,故其相应粗细骨料总表面积较湿筛砼粗细骨料总表面积小,因而全级配砼中骨料的总粘结力反而减少,致使抗拉强度降低。第三是全级配砼因诸如泌水等原因所引起的界面裂纹较湿筛砼多而大,且这些裂纹对砼抗拉强度的影响大大超过对抗压强度的影响。综上所述可知全级配砼大试件的抗拉强度较湿筛砼小试件的相应值低。这与内维尔<sup>[1]</sup>的论述,“空气含量每增加 1%,抗压强度损失 5.5%,而对断裂模量(指抗弯强度)的影响则小得多”相一致。

从表 2、6 中还可以看出,在水灰比及外加剂掺量基本相同的条件下,正长岩与玄武岩两种砼的用水量也相同,其抗压与劈裂抗拉强度也相近,但弹性模量与极限拉伸值却相差较大,其中玄武岩砼的弹性模量较正长岩砼约大 30%,而极限拉伸值则低 20%左右。二滩电站的试验资料表明,正长岩的弹性模量一般为  $3.0 \times 10^4 \sim 6.0 \times 10^4$  MPa,玄武岩的弹性模量为  $7.0 \times 10^4 \sim 10 \times 10^4$  MPa 也证实了这一点。

表 8 列出了全级配砼一年龄期主要力学特性资料。由于砼成型时水泥不够,该表缺单掺木钙全级配砼资料。从该表可以看出,大小试件有关特性的比值较一般规律偏高,其原因如前所述。

大于 90d 龄期的全级配砼大试件在 5000t 压力机上进行的。

试验时发现正长岩砼试件一般在极限荷载的 30%~70%(玄武岩试件为 20%~60%)时,在试件的顶面和底面(即试件受荷侧面)产生肉眼可见裂纹,同时随着荷载的增加裂纹闭合,最后裂纹拉开至破坏。为了验证该现象,我们对一年龄期玄武岩在受压时同时进行超声波检测,结果发现在极限荷载 28%~43%时,波速明显降低,在极限荷载 54%时产生肉眼可见裂纹。上述现象说明全级配在应力较低时,其内部已产生微细裂纹。至于产生裂纹原因尚需深入研究。

(五)压汞测孔试验

采用压汞测孔技术对全级配与湿筛试件中的水泥砂浆进行了微观孔隙试验,试件的测试龄期为 180d,其结果列于表 9。从该表可以看出湿筛后的孔隙半径大于全级配的孔隙半径。同时全级配的总孔隙体积及孔隙数量均大于湿筛后的砼。根据压汞测孔的有关资料中的  $dV/d\log r \sim \log r$  图中的分析( $V$  为孔隙体积,  $r$  为

表 7 不同振捣方式对砼强度的影响

试验编号	抗压强度 (MPa)		劈裂抗拉强度 (MPa)	
	振动台	振动棒	振动台	振动棒
E <sub>30</sub>	19.0	21.3	1.57	1.74
E <sub>32</sub>	17.7	20.2	1.43	1.55

注:两种振捣方式均以砼振实为准,试件尺寸为 45cm×45cm×45cm,龄期为 28d。

表 8 一年龄期砼的基本力学特性

试验编号	抗压强度 (MPa)			抗压强度比值		
	φ45×90cm	φ15×30cm	R <sub>20</sub> ×20×20cm	φ45/φ15	φ15/R <sub>20</sub>	φ45/R <sub>20</sub>
E <sub>25</sub>	31.3	42.4	47.8	0.737	0.887	0.655
E <sub>27</sub>	24.5	37.3	41.4	0.702	0.901	0.592
E <sub>28</sub>	23.9	28.8	34.3	0.827	0.840	0.697
E <sub>30</sub>	31.2	41.1	44.4	0.759	0.926	0.703
E <sub>31</sub>	25.3	34.0	41.3	0.744	0.823	0.613
E <sub>32</sub>	24.4	32.5	36.4	0.751	0.893	0.670
平均值				0.75	0.88	0.65

表 9 砂浆压汞测孔结构的特征参数

试件编号	总孔隙体积 (ml/g)	总孔隙表面积 (m <sup>2</sup> /g)	平均孔隙半径 $\bar{r}$ (Å)	毛细孔占总孔隙百分数 (%)
E <sub>25</sub> (全)	0.1054	29.07	73	49.21
E <sub>25</sub> (湿)	0.0933	24.54	76	42.58
E <sub>28</sub> (全)	0.1132	29.46	77	52.93
E <sub>28</sub> (湿)	0.1085	24.42	89	50.33
E <sub>16</sub> (全)	0.1098	32.66	67	54.33
E <sub>16</sub> (湿)	0.0914	27.06	68	46.42

孔隙半径),还可以看出,孔隙直径小于400Å(1Å=10<sup>-10</sup>m)时,全级配砵大试件的孔隙频数明显多于湿筛砵小试件孔隙的频数。反之,当气泡孔径大于约400Å时,则全级配砵大试件的孔隙频数明显低于湿筛砵小试件的孔隙频数。说明全级配砵大试件的气泡孔径均较湿筛砵的小,这是因为全级配砵大试件采用高频振捣器能消除砵中的大气泡所致。如果再考虑中粗骨料所占的比例,则可认为全级配砵中微细孔隙数量及孔径均较湿筛砵中的小。因此全级配砵大试件低龄期的抗压强度反而较湿筛砵小试件的抗压强度高。

#### (六)硬化砵的气泡测定

我们采用 JQH-I 型砵气孔分析显微镜对 E<sub>26</sub>、E<sub>28</sub>、E<sub>46</sub> 三组试件的全级配与湿筛砵进行了亚微观气泡孔隙测量。测量结果列于表10。从表10中可以看出全级配砵的气泡平均孔径低于湿筛砵,且与前面压汞测孔结果的规律性相同。其含气量变化规律也与砵拌和物的实测值基本相同。也就是说全级配砵的气泡间距大于湿筛砵的气泡间距,而全级配砵的气泡孔径则小于湿筛砵的气泡孔径。因此掺木钙、引气剂全级配混凝土的抗压强度高于湿筛砵。但是由于单掺木钙的湿筛砵(E<sub>46</sub>)其本身含气量很小,对其抗压强度影响很小,故其抗压强度较全级配砵高。

表10 硬化砵气泡参数测定结果

编号	测试气泡弦长		导线全长 (mm)	气泡平均半径 (mm)	含气量 (%)	
	次数	个数				
E <sub>26</sub> (全)	52	185	56.41	4900	0.23	1.2
E <sub>26</sub> (湿)	34	407	156.71	3400	0.29	4.6
E <sub>28</sub> (全)	52	409	138.55	5200	0.25	2.7
E <sub>28</sub> (湿)	30	544	196.49	3000	0.27	6.5
E <sub>46</sub> (全)	30	38	7.44	3000	0.15	0.25
E <sub>46</sub> (湿)	33	100	33.00	3000	0.32	1.27

的气泡间距,而全级配砵的气泡孔径则小于湿筛砵的气泡孔径。因此掺木钙、引气剂全级配混凝土的抗压强度高于湿筛砵。但是由于单掺木钙的湿筛砵(E<sub>46</sub>)其本身含气量很小,对其抗压强度影响很小,故其抗压强度较全级配砵高。

### 五、推荐砵配合比

根据二滩水电站有关设计资料,我们对四级配正长岩与玄武岩砵的配合比试验结果进行了计算,计算条件如下:砵的强度保证率85%(按水工砵试验规程 SD105-82中的有关图表查得标准正态变量 t=1.06), C<sub>v</sub> 值为0.12,则推算出砵实配标号列于表11。

根据表6的试验资料经回归分析,可得出正长岩砵 180d 龄期20cm 边长立方体的抗压强度(R<sub>正</sub>)与灰水比(C/W)的关系式如下:

$$R_{正} = -39.64 + 35.63C/W \quad (1)$$

同样可得出玄武岩砵180d 龄期20cm 边长立方体试件的抗压强度(R<sub>玄</sub>)与灰水比(C/W)的关系式如下:

$$R_{玄} = -9.15 + 22.48C/W \quad (2)$$

由于试验时正长岩的含气量大于4%,因此根据表4有关的试验资料进行修正,再根据(1)、(2)两式经计算,可推荐出掺木钙及引气剂的正长岩与玄武岩砵的配合比。

### 六、结 论

联合掺用减水剂与引气剂后,不但减少了砵的单位用水量,节约了水泥,而且改善了砵的和易性,这是保证人工骨料砵浇筑质量的重要措施之一。

采用高频振动器振实的砵,可消除砵中的较大气泡,对砵的抗压强度影响较小。试验结果

表11 推荐砵标号

设计砵标号(MPa)	25.0	30.0	35.0
推算砵配合比标号(MPa)	28.6	34.4	40.1

表明,全级配砷大试件与湿筛边长20cm小试件抗压强度比值,180d龄期为1.0左右(单掺木钙的比值为0.81),一年龄期为0.95。劈裂抗拉强度两者的比值在0.77~0.96之间。全级配砷受压弹性模量稍高于湿筛砷的弹性模量。

当砷中的含气量超过3.5%以后,其抗压强度有较大的降低,与一般试验成果相符,因此在施工中应引起注意。

风化骨料由于表面风化物的存在影响了砷体内水泥浆与骨料的粘结力,故对砷的抗拉强度有明显的影晌,对高标号抗压强度也有较大的影响。

玄武岩砷与正长岩砷比较,其容重较大、弹性模量偏高,极限拉伸值也较低,因此玄武岩砷抗裂性能相对较差。

#### 参 考 文 献

- 1 A. M. 内维尔著,混凝土的性能,中国建筑工业出版社
- 2 某电站大坝四级配混凝土大试件抗压强度试验报告,水利水电技术,1976年第2期,东北勘测设计院科学研究所。

(上接49页)

### Test on Compound Geomembrane Material for Seepage Control of Cladding and Its Construction Technique

Peng Weineng Zhang Jianhua Zhang Futian  
(The Fifth Hydroelectric Engineering Bureau)

**Abstract** Compound geomembrane is a kind of seepage material which is rapidly developed recent years. The construction and test methods for compound geomembrane applied in the construction of Baozushi Hydropower Station are summarized. Experimental studies on compound geomembrane during construction period are presented.

**Key Words** compound geomembrane, Baozushi Hydropower Station, construction cofferdam.

### 本刊1992年第5期更正

页 行	误	正
封 2	江瑞玉	江瑞俊
4 3	我局在街子...	我局在铜街子...
4 倒19	沉井23个。(包括...)	沉井23个(包括...)
64 12	分别为13000和6100m <sup>2</sup>	分别为13000m <sup>2</sup> 和6100m <sup>2</sup>
71图1	未注流量单位	单位:流量为 m <sup>3</sup> /s
71 倒14	用载重54的原轮渡驳船	用载重54t的原轮渡驳船
86 13(表3)	3968	2968

(本刊编辑部)