

三峡工程三期围堰碾压混凝土配合比设计

杨华全 ,董维佳 ,李家正

(长江水利委员会长江科学院材料所 ,湖北 武汉 430010)

摘要 :为合理选择三峡工程三期围堰碾压混凝土设计和施工的各项技术参数 ,对混凝土的力学性能、变形性能、耐久性等进行了试验 .结果表明 ,在水胶比相同时 ,混凝土的抗压强度有随粉煤灰掺量的增加而降低的趋势 ;碾压混凝土的抗压弹性模量随龄期的增长而增加 ;碾压混凝土掺用高效减水剂和引气剂后 ,其 90 d 龄期的抗冻标号均可达到 F50 ;混凝土的干缩率随龄期的增加而增大 ;推荐的三期围堰碾压混凝土配合比具有单位用水量小、水泥用量少、耐久性好等特点.

关键词 :混凝土 ;水泥 ;粉煤灰 ;配合比设计 ;三峡水利枢纽

中图分类号 :TV431 **文献标识码 :**B **文章编号 :**1006-7647(2006)S1-0083-03

三峡工程三期围堰采用碾压混凝土全断面施工 ,其主要特点是浇注仓面大、施工强度高、温控要求严 ,对各项性能尤其是耐久性要求高等 .因此 ,碾压混凝土配合比设计的主要目的 ,就是在满足设计指标和施工要求的前提下 ,合理选择三期围堰碾压混凝土设计和施工的各项参数 ,尽可能降低混凝土的单位用水量 ,节约水泥 ,提高混凝土的抗裂性及耐久性 .

1 碾压混凝土主要技术指标

三峡工程三期围堰碾压混凝土主要技术指标见表 1. 设计标号 R₉₀200 ,R₂₈150 碾压混凝土的强度保证率 $P \geq 85\%$,80% ,离差系数 $C_v \leq 0.18$.

表 1 碾压混凝土主要技术指标

标 号	级 配	抗冻等级	抗渗等级	极限拉伸值/10 ⁻⁶	
				28 d	90 d
R ₉₀ 150	三	F50	W4	≥60	≥65
R ₉₀ 200	二、三	F50	W8	≥65	≥70
R ₂₈ 150	三	F50	W8	≥60	
R ₂₈ 200	二、三	F50	W8	≥65	

2 试验原材料

水泥采用葛洲坝水泥厂生产的 525 号中热硅酸盐水泥 .粉煤灰为湖北阳逻电厂粉煤灰 ,细度 1.9% ;需水量比 92% ;烧失量 0.6% ;含水量小于 1% ,三氧化硫 0.29% ;密度 2.13 g/cm³ .均符合国标 GB1596—1996《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》

1 级粉煤灰标准 .

外加剂为浙江龙游外加剂厂生产的 ZB-1 缓凝高效减水剂 ,掺量为 0.7% ;引气剂为 DH9s ,掺量为 0.03% .

粗骨料为花岗岩人工碎石 ,碎石表观密度为 2 710 kg/m³ ,吸水率为 0.5% .碾压混凝土试验石子级配分别采用二级配、小三级配、三级配 ,二级配中小石之比 45:55 ,小三级配、三级配大石、中石、小石之比为 30:40:30 .

细骨料为下岸溪料场和古树岭料场的人工砂 ,下岸溪斑状花岗岩人工砂的表观密度为 2 620 kg/m³ ,吸水率为 0.99% ,细度模数为 2.86 ,石粉含量为 11.9% ;古树岭闪云斜长花岗岩人工砂的表观密度为 2 630 kg/m³ ,吸水率为 0.93% ,细度模数为 2.92 ,石粉含量为 6.1% .

3 碾压混凝土性能试验

3.1 配合比

碾压混凝土作为水工大体积混凝土 ,必须满足设计要求的强度、耐久性以及施工时的抗分离性、工作性等要求 ,同时还必须具有经济性 .

通过试拌初步确定了 30 个配合比进行试验 .这 30 个配合比都采用 0.50 水胶比 ,粉煤灰掺量从 40% ~ 65% ,选用不同的级配、砂率和不同品种的砂 .从试拌结果来看 :

a. 在水胶比、粉煤灰掺量及砂率相同时 ,用下

岸溪砂拌制的二级配碾压混凝土的用水量约在 87 ~ 89 kg/m³ 之间 ,小三级配约在 74 ~ 76 kg/m³ 之间 ,三级配约在 70 ~ 72 kg/m³ 之间。

b. 小三级配碾压混凝土的用水量比二级配的约低 13 kg/m³ ,三级配的比小三级配的约低 4 kg/m³。

c. 用古树岭砂配制的二级配碾压混凝土的用水量约在 101 ~ 103 kg/m³ 之间 ,三级配的在 81 ~ 83 kg/m³ 之间。三级配碾压混凝土的用水量比二级配的约低 20 kg/m³ ;用古树岭砂配制的碾压混凝土用水量比用下岸溪砂拌制的碾压混凝土的用水量多 11 ~ 14 kg/m³。

3.2 力学性能

3.2.1 强度

碾压混凝土各龄期的抗压强度、劈拉强度、轴拉强度、极限拉伸值和抗压弹性模量试验结果列于表 2 中。从表 2 可以看出：

a. 碾压混凝土的强度随龄期的增加而增长 ,由于粉煤灰掺量较大 ,碾压混凝土后期强度增长较多。

b. 按抗压强度选取 ,设计标号 R₉₀150 的混凝土 ,水胶比 0.50 ,粉煤灰掺量在 60% 范围内 ,能满足设计要求 ;设计标号 R₉₀200 的混凝土 ,水胶比 0.50 ,粉煤灰掺量在 55% ~ 60% 范围内 ,能满足设计要求 ;设计标号 R₂₈150 的混凝土 ,水胶比 0.50 ,粉煤灰掺量在 50% ~ 55% 范围内 ,满足设计要求 ;设计标

号 R₂₈200 的混凝土 ,水胶比 0.50 ,粉煤灰掺量在 40% ~ 50% 范围内 ,满足设计要求。

根据表 2 中的试验结果 ,若以 28 d 龄期的强度为 100% ,则不同龄期的抗压强度及劈拉强度、轴拉强度的增长率用下岸溪砂和古树岭砂配制的混凝土 ,其抗压强度的增长率 7 d 平均分别为 53.9% 和 49.4% ,90 d 平均分别为 145.9% 和 151.3% ,劈拉强度的增长率 7 d 平均分别为 44.3% 和 47.4% ,90 d 平均分别为 146% 和 153% ,抗压弹性模量的增长率 7 d 平均分别为 67.2% 和 60.5% ,90 d 平均分别为 136% 和 126% ,用古树岭石屑砂配制的碾压混凝土压拉比 ,7 d 28 d 90 d 龄期分别在 12.0 ~ 12.9 ,11.0 ~ 13.3 和 11.8 ~ 13.8 之间 ,平均值分别为 12.6 ,12.0 和 12.9。抗压强度与轴拉强度的比值 ,28 d 90 d 龄期分别在 7.8 ~ 10.1 和 11.1 ~ 12.4 之间 ,平均值分别为 9.1 和 11.8。用下岸溪砂配制的碾压混凝土压拉比(抗压强度与劈拉强度的比值) ,7 d 28 d 90 d 龄期分别在 12.3 ~ 19.6 ,9.4 ~ 15.6 和 9.4 ~ 14.9 之间 ,平均值分别为 14.7 ,12.0 和 12.1。抗压强度与轴拉强度的比值 ,28 d 90 d 龄期分别在 7.1 ~ 16.5 和 9.1 ~ 13.9 之间 ,平均值分别为 11.4 和 11.6。碾压混凝土的轴拉强度略高于劈拉强度。总体而言 ,抗压强度低 ,压拉比就大一些 ,反之 ,抗压强度高 ,压拉比就小一些 ,压拉比随着粉煤灰掺量的增加而提高。

表 2 三峡工程三期围堰碾压混凝土力学性能试验结果

编号	粉煤灰 掺量/%	胶材 用量	级配	砂品种	抗压强度/MPa			劈拉强度/MPa			轴拉强度/MPa		极限拉伸值/10 ⁻⁶		抗压弹性模量/GPa		
					7 d	28 d	90 d	7 d	28 d	90 d	28 d	90 d	28 d	90 d	7 d	28 d	90 d
1	40	178	二	下岸溪	15.5	23.6	32.8	0.79	2.04	2.20	2.09	2.61	65	85	17.4	25.0	38.4
2	50	176	二	下岸溪	11.9	21.5	28.0	0.72	1.80	2.12	1.91	2.26	60	81	16.9	24.0	35.2
3	55	176	二	下岸溪	9.3	19.9	25.5	0.61	1.62	2.10	1.70	2.06	57	80	14.8	22.3	33.6
B3	55	174	二	下岸溪	7.5	13.2	24.4	0.60	1.13	2.09	1.04	1.97	50	72	12.6	17.4	26.2
4	60	174	二	下岸溪	7.8	15.9	22.9	0.47	1.40	2.05	1.54	2.15	56	75	14.4	21.3	31.5
5	65	206	二	下岸溪	5.8	11.3	20.8	0.46	1.08	1.99	1.32	2.17	53	71	15.6	20.3	29.3
6	40	204	二	古树岭	11.6	21.6	29.8	0.90	1.96	2.52	2.64	2.68	91	93	16.5	25.9	33.4
7	50	204	二	古树岭	9.2	20.0	27.8	0.72	1.69	2.18	2.00	2.29	79	85	14.9	25.0	32.1
8	55	202	二	古树岭	7.8	18.5	26.9	0.65	1.53	1.95	1.77	2.17	65	69	13.3	25.4	31.3
11	40	202	小三	下岸溪	14.0	24.5	34.6	1.18	2.18	2.88	1.84	2.83	64	84	17.7	29.9	39.0
12	50	152	小三	下岸溪	12.5	21.4	27.9	0.84	1.63	2.29	1.65	2.52	63	76	17.5	27.2	36.5
13	55	150	小三	下岸溪	9.2	19.6	24.3	0.62	1.26	2.08	1.53	2.37	63	73	17.4	24.9	33.4
14	60	150	小三	下岸溪	8.3	16.9	23.5	0.57	1.09	1.93	1.20	2.19	61	69	16.1	23.1	31.2
15	65	148	小三	下岸溪	6.9	13.2	22.5	0.56	1.02	1.80	0.80	1.94	60	64	14.6	22.8	30.6
21	40	148	三	下岸溪	15.2	24.1	33.4	0.96	2.10	2.45	2.19	2.40	72	78	18.5	27.4	35.6
22	50	143	三	下岸溪	12.9	21.5	30.1	0.86	1.80	2.20	1.89	2.29	66	76	15.5	25.7	34.5
23	55	142	三	下岸溪	10.3	20.1	29.1	0.65	1.60	2.13	1.78	2.33	61	76	15.7	24.2	33.6
B23		142	三	下岸溪	9.0	16.2	21.5	0.64	1.46	1.90	1.72	2.35	55	77	15.8	23.9	25.3
24	60	142	三	下岸溪	7.4	14.9	20.2	0.52	1.45	2.05	1.69	1.95	56	57	15.0	23.7	28.2
25	65	140	三	下岸溪	4.8	10.1	17.5	0.35	1.08	1.87	1.42	1.52	57	59	16.4	23.2	26.6
26	40	166	三	古树岭	12.4	21.8	30.2	0.96	1.92	2.49	2.30	2.70	90	93	18.2	27.1	33.7
27	50	164	三	古树岭	9.2	18.9	28.2	0.72	1.42	2.21	1.88	2.40	82	86	17.3	26.0	32.5
28	55	164	三	古树岭	6.8	14.0	27.7	0.55	1.06	2.10	1.80	2.31	78	86	16.1	26.0	32.4
29	60	162	三	古树岭	6.5	13.5	27.0	0.54	1.11	2.01	1.65	2.25	67	79	15.0	26.3	32.4
30	65	162	三	古树岭	6.8	12.9	26.5	0.54	1.16	2.00	1.60	2.22	66	70	14.0	25.2	32.0

注 :表中水胶比均为 0.50。

3.2.2 极限拉伸值与抗压弹性模量

碾压混凝土的极限拉伸值与抗压弹性模量的试验结果见表 2。从试验结果可以看出 ,由于粉煤灰掺量较大 ,28 d 龄期的抗拉强度和极限拉伸值较低。设计标号为 R₉₀200 的碾压混凝土 ,水灰比取 0.5 ,粉煤灰掺量在 55% 以下时 ,极限拉伸值可满足设计要求 ,设计标号为 R₂₈200 的碾压混凝土 ,水灰比 0.5 ,粉煤灰掺量在 45% 以下时极限拉伸值可以满足设计要求。

碾压混凝土的抗压弹性模量随龄期的增长而增加 ,用下岸溪砂配制的碾压混凝土抗压弹性模量的增长率 ,7 d 龄期平均为 67.2% ,90 d 龄期平均为 136% ,比抗压强度的增长率略高。极限拉伸值的增长率 ,28 d 龄期平均为 83.4%。

3.3 抗渗性能

碾压混凝土的抗渗试验结果列于表 3。抗渗试验结果表明 ,对于设计龄期为 28 d 的碾压混凝土 ,抗渗标号要达到 W8 ,如果水胶比采用 0.50 时 ,则粉煤灰掺量不能大于 50% ;如果水胶比采用 0.55 时 ,除了掺 40% 粉煤灰的二级配碾压混凝土能满足抗渗要求外 ,其他水胶比为 0.55 的混凝土配合比都不能满足抗渗要求。对于设计龄期为 90 d 的碾压混凝土 ,从抗渗角度看 ,即使水胶比为 0.55 ,粉煤灰掺量达到 60% ,也能满足抗渗要求。

表 3 碾压混凝土抗渗试验结果

编号	水胶比	粉煤灰掺量/%	级配	砂品种	龄期/ d	试验压力 /MPa	渗水 高度/cm	抗渗 等级
1	0.45	40	二	下岸溪	28	0.8	10.6	> W8
					90	0.8	8.2	> W8
3	0.45	55	二	下岸溪	28	0.8	10.9	> W8
					90	0.8	2.4	> W8
5	0.45	65	二	下岸溪	28	0.8	14.0	> W8
					90	0.8	9.5	> W8
6	0.50	40	二	古树岭	28	0.8	13.0	> W8
					90	0.8	12.3	> W8
8	0.50	55	二	古树岭	28	0.6	透	W6
					90	0.8	3.0	> W8
11	0.50	40	小三	下岸溪	28	0.5	透	W5
					90	0.8	6.0	> W8
13	0.50	55	小三	下岸溪	28	0.8	13.9	> W8
					90	0.8	10.9	> W8
15	0.55	65	小三	下岸溪	28	0.5	透	W5
					90	0.8	4.2	> W8
21	0.55	40	三	下岸溪	28	0.3	透	W3
					90	0.8	7.8	> W8
23	0.55	55	三	下岸溪	28	0.8	11.7	> W8
					90	0.8	9.5	> W8
B23	0.45	55	三	下岸溪	28	0.8	12.9	> W8
					90	0.8	3.3	> W8
25	0.45	65	三	下岸溪	28	0.8	13.5	> W8
					90	0.8	8.7	> W8

3.4 干缩性能

碾压混凝土的干缩试验结果列于表 4 ,从干缩率的试验结果来看 :

a. 混凝土的干缩率随龄期的增加而增大 ,但增长的速率在不同的龄期是不同的 ,一般而言 ,早期增长得快一些 ,后期增长得慢一些。

b. 在水胶比相同时 ,随着粉煤灰掺量的增加 ,混凝土的干缩率有减小的趋势 ,当粉煤灰掺量在 50% 以下时 ,增加粉煤灰掺量使混凝土后期干缩率有较明显降低 ,粉煤灰掺量在 50% 以上时 ,增加粉煤灰掺量混凝土后期干缩率降低不明显。

表 4 碾压混凝土干缩试验结果

编号	粉煤灰 掺量/%	砂品种	级配	干缩率/10 ⁻⁶							
				1d	3d	7d	14d	28d	60d	90d	
1	40	下岸溪	二	66	110	190	197	294	330	367	
2	50	下岸溪	二	80	112	165	190	265	278	330	
3	55	下岸溪	二	91	123	149	185	249	259	309	
4	60	下岸溪	二	82	130	176	200	258	265	315	
5	65	下岸溪	二	77	136	213	246	267	272	309	
6	40	古树岭	二	63	112	175	195	220	293	342	
7	50	古树岭	二	48	90	123	136	195	251	305	
8	55	古树岭	二	27	72	97	119	170	227	285	
11	40	下岸溪	小三	31	100	159	216	305	325	356	
13	55	下岸溪	小三	42	113	131	208	285	293	317	
15	65	下岸溪	小三	37	102	129	199	276	284	301	
21	40	下岸溪	三	28	70	100	138	198	267	302	
22	50	下岸溪	三	30	68	111	142	195	235	290	
23	55	下岸溪	三	25	65	119	165	198	218	270	
24	60	下岸溪	三	30	61	105	165	190	220	275	
25	65	下岸溪	三	34	55	100	161	187	231	284	

注 水胶比均为 0.50。

3.5 绝热温升

选择了 2 个配合比进行绝热温升试验 ,试验结果见表 5。试验结果表明 :同水灰比、粉煤灰掺量的前提下 ,胶凝材料用量对混凝土的绝热温升有较大影响 ,三级配碾压混凝土的胶凝材料用量比二级配低 ,绝热温升也相对较低。三级配混凝土与二级配混凝土各龄期的绝热温升相比 ,其中 ,1 d ,2 d ,3 d ,4 d ,5 d ,6 d ,7 d 龄期分别高 1.2℃ ,2.7℃ ,3.1℃ ,3.4℃ ,3.9℃ ,4.2℃ 和 4.2℃。

表 5 碾压混凝土绝热温升试验结果 ℃

编号	1 d	2 d	3 d	4 d	5 d	6 d	7 d	10 d	14 d	21 d	28 d
3	3.2	8.2	11.3	13.5	15.3	16.6	17.4	18.4	19.0	19.3	19.4
23	2.0	5.5	8.2	10.1	11.4	12.4	13.2	14.5	15.1	15.4	15.6
B23	2.8	7.0	9.8	12.0	13.7	15.0	16.1	17.8	18.5	18.9	19.0

3.6 抗冻性能

碾压混凝土由于受周围介质如水、大气、温度冲击和干湿循环作用 ,因此要求碾压混凝土具有一定的耐久性 ,以抵抗干湿、冷热、冻融、(下转第 92 页)

3 结 语

- a. 对于防浪墙的施工尤其是Ⅲ期 1.2 m 外露部分 ,考虑到坝体位移与沉降 ,PDCA 循环建议在保证下游坝顶路面宽的情况下 ,参照原设计防浪墙轴线进行合理调整。
- b. 对于防浪墙模板的支护 ,尤其对于上游无支护点的情况 ,PDCA 循环建议尽量从下游着手 ,解决支拉问题。在无法施工情况下 ,可事先在上游混凝土面板中预埋锚板等。
- c. 对薄壁混凝土施工 ,选择合理级配 ,同时要严格控制其坍落度的大小。在大坝防浪墙Ⅲ期混凝土施工中 ,原坍落度为 7 ~ 9 cm ,经过几次 PDCA 循环的应用 ,改为 5 ~ 7 cm ,效果良好。
- d. 正确分析施工防浪墙难度 ,根据其截面结构形式进行合理的分期工作 ,使得支模、钢筋安装、混凝土浇筑等在合理工序下进行作业。从施工中 PDCA 循环情况来看 ,大坝防浪墙分 3 期施工 ,基本合理 ,建议Ⅱ期 2.4 cm 范围应适当放小一些。
- e. 防浪墙的混凝土施工应和坝体填筑、下游坝顶路面施工进行合理交叉作业。在匹配施工过程

(上接第 85 页)

碳化等破坏。混凝土的抗冻性是评定混凝土耐久性的综合指标。碾压混凝土抗冻性能试验结果见表 6 ,试验结果表明 :碾压混凝土掺用高效减水剂和引气剂后 ,其 90 d 龄期的抗冻标号均可达到 F50。

表 6 碾压混凝土抗冻性能试验结果

编号	粉煤灰 掺量/%	级配	砂品种	各循环次数相对 重量损失/%			各循环次数相对 动弹性模量/%			抗冻 标号
				0	25	50	0	25	50	
1	40	二	下岸溪	0	0.2	0.1	100	90.5	88.1	> F50
3	55	二	下岸溪	0	0.5	0.5	100	87.4	82.9	> F50
5	65	二	下岸溪	0	0.1	1.6	100	91.9	87.8	> F50
6	40	二	古树岭	0	0.1	0.6	100	93.5	91.2	> F50
8	55	二	古树岭	0	0.1	0.2	100	92.4	86.9	> F50
15	65	小三	下岸溪	0	0.4	0.9	100	89.6	86.8	> F50
21	40	三	下岸溪	0	0.1	0.4	100	91.9	87.8	> F50
23	55	三	下岸溪	0	0.1	0.4	100	91.5	92.3	> F50
25	65	三	下岸溪	0	0.5	0.8	100	85.4	76.3	> F50

注 水胶比均为 0.50。

4 结 语

- a. 极限拉伸值和抗渗标号 ,尤其是 28 d 龄期 ,对碾压混凝土的配合比参数的选择起控制作用。
- b. 对 R₉₀150 和 R₉₀200 d 的碾压混凝土 ,水胶比可分别采用 0.53 和 0.50 ,设计标号 R₉₀150 的碾压混

- 中 ,合理运用科学管理手段进行微、宏观控制。多次 PDCA 循环的实践后 ,莲花水电站坝顶施工考虑为 :防浪墙Ⅰ ,Ⅱ期自右向左施工 ,坝体填筑在Ⅱ期结束后进行 ,并事先预留回车处。Ⅲ期自右向左随填筑进行施工。路面混凝土可以考虑和Ⅲ期同步进行。
- f. PDCA 循环运用要求防浪墙分期支模 ,对于Ⅱ ,Ⅲ期的支模结构形式 ,应全部采用悬臂梁结构 ,这样对其整体倾覆性等方面都有所保证。
- g. 防浪墙施工过程应建立一套科学合理的管理体系。莲花水电站大坝防浪墙运用了全面质量检查中的 PDCA 循环 ,取得了很好的效果。同时成立了一个协调组^[2] ,负责大坝坝顶各家施工单位的协调工作 ,使得施工得以顺得进展。

参考文献 :

[1] 白海萍 ,来延肖 ,韩建明 .混凝土质量相关因素分析及施工过程控制[J].西北建筑工程学院学报 ,1999 ,2(1):15-19.

[2] 焦雷 ,翟国政 .施工质量的研究与控制技术在模板工程中的应用[J].四川建筑科学研究 ,2004 ,30(4):114-116.

(收稿日期 2005-09-14 编辑 熊水斌)

凝土 ,粉煤灰的掺量可选 55% ~ 60% ,设计标号 R₉₀200 的混凝土粉煤灰的掺量可选 50% ~ 55%。设计标号为 R₂₈150 和 R₂₈200 的碾压混凝土 ,水胶比可分别采用 0.50 和 0.45 ,粉煤灰掺量可选 40% ~ 50%。

- c. 同水胶比、粉煤灰掺量的前提下 ,胶凝材料用量对混凝土的绝热温升有较大影响 ,二级配混凝土和三级配变态混凝土的胶凝材料用量接近 ,绝热温升相当 ,三级配碾压混凝土的胶凝材料用量比二级配低 ,绝热温升也相对较低。
- d. 碾压混凝土的干缩随粉煤灰掺量的增加和胶材用量的减少明显降低。
- e. 碾压混凝土 90 d 龄期的抗冻标号均可达到设计要求。

参考文献 :

[1] 杨华全 ,王迎春 ,李家正 ,等 .三峡工程大坝混凝土的配合比优化设计试验研究[J].混凝土 ,2002(11):29-31.

[2] 杨华全 ,李家正 ,董维佳 ,等 .三峡工程三期围堰碾压混凝土试验研究[J].长江科学院院报 ,2004 ,21(2):6-9.

[3] 杨华全 ,陈少雄 ,黎敏珠 .碾压混凝土长龄期的变形性能试验研究[J].长江科学院院报 ,1998 ,15(1):6-9.

(收稿日期 2006-02-21 编辑 熊水斌)