马堵山水电站厚层碾压混凝土现场试验及检测仪器对比测试成果

李春敏[1]，刘树坤[2]，谢彦辉[3]，月本行则[4]

(1. 北京浩华江河国际水利工程咨询有限公司，北京 100053；2. 中国水利水电科学研究院，北京 100038；3. 广东水电二局股份有限公司，广东 增城 511340；4. 日本酒井重工业株式会社，日本 东京 105－0012)

摘 要：在云南红河马堵山水电站工地进行了厚层碾压混凝土现场试验，并在黄花寨水电站厚层碾压混凝土试验的基础上，针对马堵山水电站的实际情况开展了厚层碾压混凝土不同摊铺厚度对比现场试验。试验中采用了日本酒井工程机械有限公司提供的SD451垂直振动碾压机，日本土壤和岩石工程技术有限公司提供大型表面透过型RI密度仪和轻便型1孔式RI密度仪，美国CPN公司MC－S－24双管分层核子密度仪。试验中，为了弥补黄花寨水电站试验过程中测试仪器的缺陷，重点进行了厚层碾压混凝土测试仪器性能对比试验，以便在工程项目实施中，选择性价比高和测试方便、操作简单的测试设备。

关键词：马堵山水电站；碾压混凝土；厚层碾压；测试仪器；碾压设备

中图分类号：TV431(274)　　**文献标识码**：B　　**文章编号**：1000-0860(2009)11-0059-09

In-situ experiment and results of compared test on RCC with thick placement lift for construction of Madushan Hydropower Station

LI Chun-min[1], LIU Shu-kun[2], XIE Yan-hui[3], Yukinori Tsukimoto[4]

(1. Beijin Haohua Rivers International Water Engineering Consulting Co., Ltd., Beijing 100053, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Guangdong No. 2 Hydropower Engineering Bureau Co., Ltd., Zengcheng 511340, Guangdong, China; 4. Sakai Heavy Industries, Ltd., Tokyo, Japan)

Abstract: An in-situ experiment on the RCC with thick placement lift for the construction of Madushan Hydropower Station on Red River in Yunnan Province is made, and moreover, the compared tests on the different lifts of the thich placement are also carried out for the actual condition of the construction of Madushan Hydropower Station on the basis of the experiment ever made in the construction of the RCC with thick placement lift for Huanghuazhai Hydropower Station. During the construction and experiment, SD451 vibratory roller with vertical vibration mechanism provided by Sakai Heavy Industries, Ltd in Japan, the nuclear moisture density gauges developed by Soil and Rock Engineering Co. Ltd., in Japan, i. e., the nuclear density gauge developed by CPN in USA are adopted. In the experiment, the compared tests on the properties of the measuring instruments for the testing of the RCC with thick placement lifts are emphatically conducted for the remedy of the defects from the measuring instruments for the relevant tests during the construction of Huanghuazhai Hydropower Station, so as to select the simple and convenient measuring instruments with higher performance-price ratio for the construction of the project concerned.

Key words: Madushan Hydropower Station; roller compacted concrete; compacted layer with thick placement lift; measuring instrument; rolling equipment

2008年11月22～23日在云南红河马堵山水电站工地进行厚层碾压混凝土现场试验，由红河广源马堵山水电开发有限公司主持，广东省水电集团有限公司负责施工，本次试验是在2006年9月黄花寨水电站厚层碾压混凝土试验的基础上，针对马堵山水电站

收稿日期：2009-09-07

作者简介：李春敏(1939—)，男，教授级高级工程师，董事长。

的实际情况，开展的厚层碾压混凝土不同摊铺厚度对比现场试验，为了弥补黄花寨水电站试验过程中测试仪器的缺陷，重点进行厚层碾压混凝土测试仪器性能对比试验，以便工程项目实施中，选择性价比高和测试方便、操作简单的测试设备。

1 试验设备

1.1 碾压设备

试验中使用的振动压路机为日本酒井工程机械有限公司提供的SD451垂直振动碾压机(见图1)，其规格见表1。

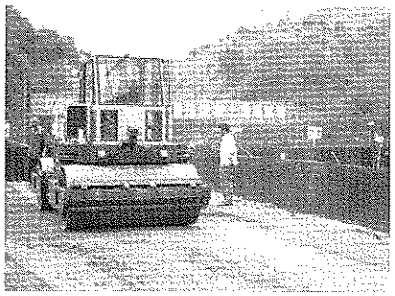

图1 SD451振动压路机

表1 振动压路机(SD451)的规格

项目	规格
型号	SD451
工作重量/kg	11 000
全长/mm	4 020
全宽/mm	2 270
碾压宽度/mm	2 100
发动机	五十铃 BB6BG1T
功率/kW	124
单轮最大激振力/kgf	23 000
振动频率/vpm	2 600
振幅/mm	1.4

1.2 测试设备

测试设备包括：(1)MC-4核子水分密度仪——美国CPN公司制造，测试深度30 cm；(2)MC-S-24双管分层核子密度仪(以下简称MC-S-24)——美国CPN公司制造；(3)大型表面透过型RI密度仪(以下简称大型表面)——日本土浪和岩石工程技术有限公司制造(SRE)，测试深度50 cm；(4)轻便型1孔式RI密度仪(以下简称轻便型)——日本土浪和岩石工程技术有限公司制造(SRE)，测试深度100 cm。

1.3 施工设备

混凝土拌和楼2×1.5 m^3自落式搅拌机、20 t自卸汽车、17 t推土机(山推制造)(因为仓内狭窄大型的推土机转不开，随将本重型机械撤出)、小型反向铲(日立建机械产)、5 t小平仓机插入式高频振动棒。

2 试验配合比

本次试验采用马堵山水电站碾压混凝土坝$C_{90}15$三级配碾压混凝土，混凝土原材料如下：(1)水泥采用通海秀山P.O 42.5水泥(相对密度3.1)，细度4.0%，3 d抗折强度为4.5 MPa，28 d为7.7 MPa，3 d抗压强度为20.6 MPa，28 d为49.5 MPa。(2)粉煤灰采用昆明阳宗海Ⅱ级粉煤灰(相对密度2.2)，细度为18.2%，需水量比100%，烧失量3.2%，三氧化硫0.2%，含水量0.1%。(3)外加剂采用山西格瑞特FDN-Ⅱ高效缓凝减水剂。(4)河砂饱和面干相对密度为2.65，细度模数3.1，石粉含量14.0%，含泥量0.96%。(5)河卵石比例，小石∶中石∶大石=30%∶40%∶30%，卵石相对密度2.68。含泥量：粒径0.5~2 cm占0.6%；粒径2~4 cm占0.5%；粒径4~8 cm占0.4%。超、逊径：0.5~2 cm石料，超径7.2%，逊径11.7%；2~4 cm石料，超径10.1%，逊径15.8%；4~8 cm石料，超径8.7%，逊径8.9%。混凝土配合比按体积法计算，混凝土含气量按1.5%计。饱和面干吸水率：砂为1.1，小石为0.80，中石为0.50，大石为0.40。11月22日2#、3#试验块使用如表2所列配合比，因砂细度模数为3.1偏粗，11月23日1#、4#试验块使用胶材175 kg(粉煤灰增加20 kg/m^3代砂)配合比来改善混凝土和易性。

3 试验块布置

本次试验分4个试验块(见图2)，按试验次序：2#仓、3#仓、1#仓、4#仓，其中2#仓、3#仓、4#仓块宽9.0 m、长14.0 m，1#仓块宽13.0 m、长14.0 m。

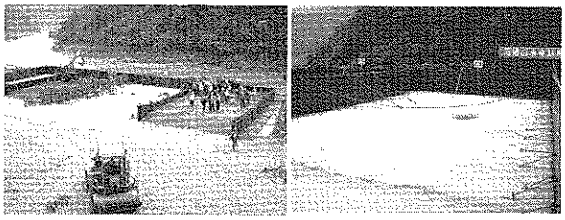

图2 试验场地

3.1 第一试验块(2#仓)

试块尺寸：长×宽=14 m×9.0 m。碾压层厚75 cm，分2次摊铺，每次摊铺厚41 cm。碾压参数分二组条

表2　马堵山水电站大坝试验施工混凝土配合比($C_{90}15$ 三级配)

强度等级	级配	外加剂		砂率/%	粉煤灰掺量/%	单位材料用量/kg·m^{-3}								VC值/s	密度/kg·m^{-3}
		品种	掺量/%			W	C	F	S	G8	G4	G2	剂		
$C_{90}15$	三	FDN－Ⅱ	0.7	33	60	88	62	93	730	450	600	450	1.1	4～7	2 473

表3　第一试验块各测点的测试结果

压实厚度及铺料次数	碾压遍数	检测设备型号	检测深度/cm	层号	压实度/%									检测点数	合格点数	合格率/%
					测点①	测点②	测点③	测点④	测点⑤	测点⑥	最大值	最小值	平均值			
2#仓：层厚75 cm，分2次铺料	2+10+2	MC－4	30	D2							101.1	97.9	99.6	6	6	100
				D1	99.8	99.5	101.1	97.9	99.7	99.8						
		MC－S－24	30	D2												
				D1												
			50	D2												
				D1												
		大型表面	30	D2							99.4	94.4	97.8	6	5	83.3
				D1	97.7	99.4	98.5	99.2	94.4	97.5						
			50	D2							101.5	94.7	99.7	6	5	83.3
				D1	94.7	100.8	100.8	101.5	99.2	100.9						
		轻便型	30	D2							100.4	95.5	98.8	6	5	83.3
				D1	95.5	98.3	99.4	100.4	99.5	99.8						
			50	D2							101.2	98.2	99.8	6	6	100
				D1	99.8	98.2	99.9	101.2	99.2	100.2						
			70	D2							99.7	95.7	98.2	6	5	83.3
				D1	99.1	97.7	98.8	95.7	97.9	99.7						
2#仓：层厚75 cm，分2次铺料	2+8+2	MC－4									101.5	98.9	99.9	6	6	100
							98.9	100.1	99.9	99.1						
		MC－S－24														
				E1												
			50	E2												
				E1												
		大型表面	30	E2							101.3	97.6	99.1	6	6	100
				E1	97.7	101.3	100.4	97.6	97.9	99.6						
			50	E2							105.1	98.4	101.3	6	6	100
				E1	98.4	105.1	98.9	102.6	100.4	102.4						
		轻便型	30	E2							100.0	97.4	98.8	6	6	100
				E1	97.4	98.8	98.1	99.1	100	99.2						
			50	E2							100.4	95.8	98.1	6	4	66.7
				E1	96.8	95.8	98.5	97.3	100.4	99.8						
			70	E2							100.4	95.8	98.0	6	4	66.7
				E1	95.8	97.1	95.8	98.7	100.3	100.4						

注：由于时间原因，D2，E2条带的混凝土未浇筑。

带：D条带为2－10－2(即静压2遍、振动碾压10遍、再静压2遍)；E条带为2－8－2(即静压2遍、振动碾压8遍、再静压2遍)。压实度测试点：各层布置6个点。各测点的测试结果见表3，碾压遍数与各密度仪所测定结果的比较见表4，压实度和从表面起深度的关系如图3所示。

表4　第一试验块碾压遍数和各密度仪所测定结果的比较

工区编号	层厚/cm	碾压遍数(静压+振动+静压)	密度仪	测定深度/cm	压实度/%			标准偏差/%	测定数	合格数	合格率/%
					平均	最大	最小				
2#	75	2+8+2	MC-4(8)	30	99.9	101.5	98.9	0.9	6	6	100
			MC-24(8)	30	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
				50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
			大型表面(8)	30	99.1	101.3	97.6	1.6	6	6	100
				50	101.3	105.1	98.4	2.5	6	6	100
			轻便式(8)	30	98.8	100.0	97.4	0.9	6	6	100
				50	98.1	100.4	95.8	1.8	6	4	67
				70	98.0	100.4	95.8	2.1	6	4	67
2#	75	2+10+2	MC-4(10)	30	99.6	101.1	97.9	1.0	6	6	100
			MC-24(10)	30	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
				50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
			大型表面(10)	30	97.8	99.4	94.4	1.8	6	5	83
				50	99.7	101.5	94.7	2.5	6	5	83
			轻便式(10)	30	98.8	100.4	95.5	1.8	6	5	83
				50	99.8	101.2	98.2	1.0	6	6	100
				70	98.2	99.7	95.7	1.4	6	5	83

注：ND表示没有测定。

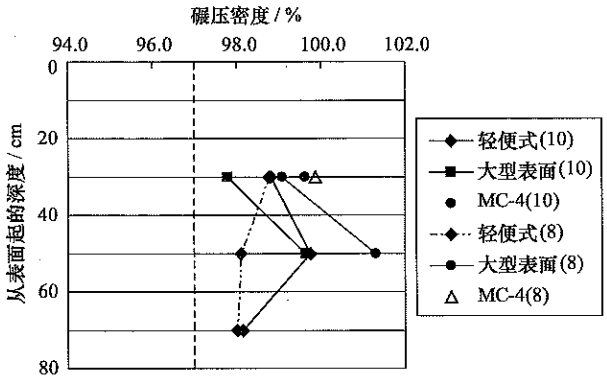

图3　第一试验块压实度和从表面起深度的关系

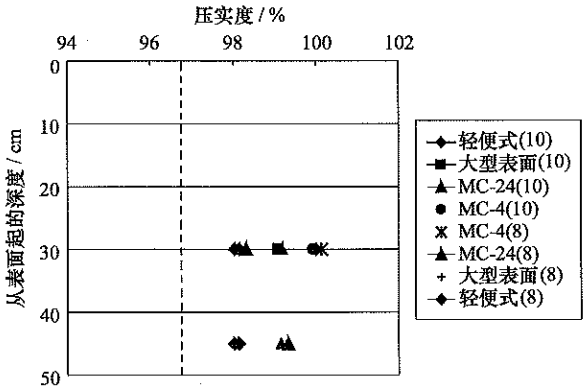

图4　第二试验块压实度和从表面起深度的关系

3.2　第二试验块(3#仓)

试块尺寸：长×宽=14 m×9.0 m。碾压层厚50 cm，共2层合计100 cm，第一层50 cm为一次摊铺54 cm；第二层50 cm分二次摊铺，每次摊铺27 cm。碾压参数分二组条带：F条带为2-8-2(即静压2遍、振动碾压8遍、再静压2遍)；G条带为2-10-2(即静压2遍、振动碾压10遍、再静压2遍)。压实度测试点：各层布置6个点，各测点的测试结果见表5，碾压遍数与各密度仪所测定结果的比较见表6，压实度与从表面起深度的关系如图4所示。

3.3　第三试验块(1#仓)

试块尺寸：长×宽=14 m×13 m。碾压层厚100 cm，分2次摊铺，每次摊铺厚54 cm。碾压参数分3组条带：A条带为2-8-2(即静压2遍、振动碾压8遍、再静压2遍)；B条带为2-10-2(即静压2遍、振动碾压10遍、再静压2遍)；C条带为2-12-2(即静压2遍、振动碾压12遍、再静压2遍)。压实度测试点：各层均布置6个点。各测点的测试结果见表7，碾压遍数与各密度仪所测定结果的比较见表8，压实度与从表面起深度的关系如图5所示。

3.4　第四试验块(4#仓)

试块尺寸：长×宽=14 m×9.0 m。碾压层厚100 cm，分4次摊铺，每次摊铺厚27 cm。碾压参数

表5　第二试验块各测点的测试结果

碾压层厚以及铺设遍数	碾压遍数	测定仪器	测定深度/cm	层编号	密度/% 测点①	测点②	测点③	测点④	测点⑤	测点⑥	最大值	最小值	平均值	测定点数	合格点数	合格率/%
3#仓：碾压层厚50 cm，1次铺料	2+8+2	MC-4	30	F2	99.3	102.0	100.3	99.1	98.5	98.9	102.0	98.5	100.1	12	12	100
				F1	100.8	100.2	101.5	99.8	100.5	100.6						
		MC-S-24	30	F2	98.4	99.7	99	100.5	96.6	101.6	101.6	95.2	98.3	12	8	66.7
				F1	95.4	97.3	95.2	96.2	99.0	100.9						
			45	F2		98.3	100.4	98.8	99.9	101.6	104.4	94.7	99.3	11	9	81.8
				F1	104.4	101.2	99.2	94.7	97.2	96.4						
		大型表面	30	F2	98.4	97.2	99.2	94.5	95.1	99.5	100.1	94.5	98.2	12	10	83.3
				F1	99.3	99.2	100.1	99.2	97.6	99.5						
			45	F2												
				F1												
		轻便型	7500	F2	96.9	98.7	100	97.4	98.4	99.9	100.6	95.1	98.2	12	8	9
				F1	100.1	97.5	100.6	95.1	95.6	97.6						
			45	F2	96.9	99.0	100.7	95.4	98.7	99.7	100.7	94.9	98.1	12	8	66.7
				F1	100.2	97.5	99.5	96.2	94.9	99.0						
3#仓：碾压层厚50cm，1次铺料	2+10+2	MC-4	30	G2	99.9	99.1	99.5	99.9	100.8	98.9	102.0	97.9	99.9	12	12	100
				G1	100.3	99.3	97.9	99.8	102.0	101.9						
		MC-S-24	30	G2	99.2	97.5	100.8	100.5	100.6	98.1	100.8	97.0	99.2	12	12	100
				G1	100.3	98.8	97.1	99.8	100.6	97.0						
			45	G2		100.6	98.7	101.3	101.1	96.0	101.3	96.0	99.2	11	9	81.8
				G1	100.2	96.5	100.2	99.0	99.1	97.6						
		大型表面	30	G2	99.2	100.5	98.3	98.7	98.2	98.3	100.5	98.2	99.1	12	12	100
				G1	99.2	99.0	98.9	98.9	100.5	99.4						
			45													
		ポータブル	30	G2	99.4	100.6	96.7	97.8	99.6	97.0	100.6	95.4	98.0	12	10	83.3
				G1	97.5	98.3	95.4	97.7	98.1	98.3						
			45	G2	99.0	101.8	97	98.7	99.7	97.9	101.8	94.3	98.0	12	10	83.3
				G1	94.3	98.1	95.2	98.2	98.6	98.0						

注：大型表面仪器不能测45 cm，按照10 cm幅度逐级进行。

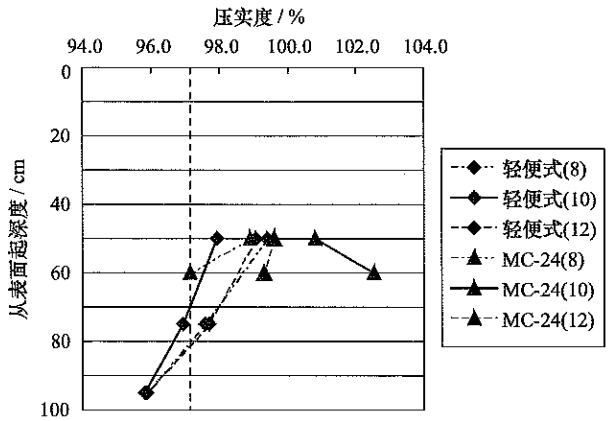

图5　第三试验块压实密度和从表面起深度的关系

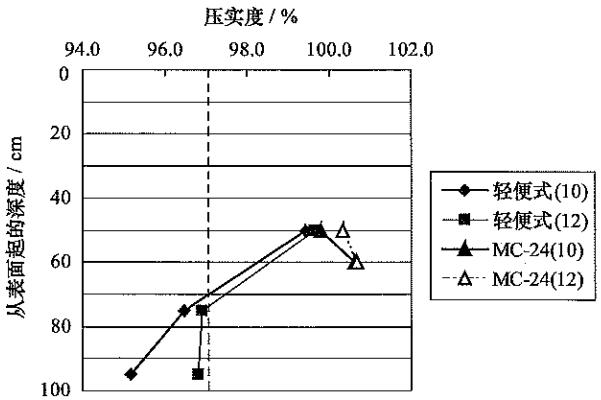

图6　第四试验块压实度和从表面起深度的关系

表6 第二试验块碾压遍数和各密度仪测定结果的比较

工区	层厚/cm	碾压遍数(静压+振动+静压)	密度仪	测定深度/cm	上下层记号		压实度/% 所有平均	层别平均	最大	最小	标准偏差/%	测定数	合格数	合格率/%
3#	50	2+8+2	MC-4(8)	30	F2	上	100.1	99.7	102.0	98.5	1.3	6	6	100
					F1	下		100.6	101.5	99.8	0.6	6	6	100
			MC-24(8)	30	F2	上	98.3	99.3	101.6	96.6	1.7	6	5	83
					F1	下		97.3	100.9	95.2	2.2	6	3	50
				45	F2	上	99.3	99.8	101.6	98.3	1.3	6	5	100
					F1	下		98.9	104.4	94.7	3.5	6	4	67
			大型表面(8)	30	F2	上	98.2	97.3	99.5	94.5	2.1	6	4	67
					F1	下		99.2	100.1	97.6	0.8	6	6	100
			轻便式(8)	30	F2	上	98.2	98.6	100.0	96.9	1.3	6	5	83
					F1	下		97.8	100.6	95.1	2.3	6	4	67
				45	F2	上	98.1	98.4	100.7	95.4	1.9	6	4	67
					F1	下		97.9	100.2	94.9	2.1	6	4	67
3#	50	2+10+2	MC-4(10)	30	G2	上	99.9	99.7	100.8	98.9	0.7	6	6	100
					G1	下		100.2	102.0	97.9	1.6	6	6	100
			MC-24(10)	30	G2	上	99.2	99.5	100.8	97.5	1.4	6	6	100
					G1	下		98.9	100.6	97.0	1.6	6	6	100
				45	G2	上	99.2	99.5	101.3	96.0	2.2	5	4	80
					G1	下		98.8	100.2	96.5	1.5	6	5	83
			大型表面(10)	30	G2	上	99.1	98.9	100.5	98.2	0.9	6	6	100
					G1	下		99.3	100.5	98.9	0.6	6	6	100
			轻便式(10)	30	G2	上	98.0	98.5	100.6	96.7	1.6	6	5	83
					G1	下		97.6	98.3	95.4	1.1	6	5	83
				45	G2	上	98.0	99.0	101.8	97.0	1.7	6	6	100
					G1	下		97.1	98.6	94.3	1.8	6	4	67

分2组条带：H条带为2-10-2(即静压2遍、振动碾压10遍、再静压2遍)；I条带为2-12-2(即静压2遍、振动碾压12遍、再静压2遍)。压实度测试点：各层均布置6个点。各测点的测试结果见表9，碾压遍数与各密度仪所测定结果的比较见表10，压实度与从表面起深度的关系如图6所示。

4 试验成果分析

4.1 摊铺层厚的影响

本次试验选择3种层厚，分别为50 cm、75 cm、100 cm。其中：对50 cm选择二种摊铺层厚，一是一次摊铺54 cm；二是分2层摊铺，每次摊铺27 cm。100 cm选择二种摊铺层厚，一是分2层摊铺，一次摊铺54 cm；二是分4层摊铺，每次摊铺27 cm。从50 cm、100 cm二种摊铺层厚对比试验压实度检测结果分析，摊铺厚度对压实度没有明显影响。

4.2 碾压参数

4.2.1 50 cm层厚

碾压参数2-8-2，测定深度在45 cm时，压实度平均值MC-S-24测值99.3%，轻便型测值为98.1%；碾压参数2-10-2，测定深度在45 cm时，压实度平均值MC-S-24测值99.2%，轻便型测值为98.0%。都超过规范97%，说明层厚50 cm的碾压混凝土，碾压参数2-8-2满足要求。

4.2.2 75 cm层厚

碾压参数2-8-2，测点深度在50 cm时，压实度平均值大型表面测值101.3%，轻便型测值为98.1%；碾压参数2-10-2，测点深度在50 cm时，压实度平均值大型表面测值99.7 %，轻便型测值为99.8%。都超过规范97%，说明50 cm深的碾压混凝土，碾压参数2-8-2满足要求。

碾压参数2-8-2，测点深度在70 cm时，压实

表7 第三试验块各测点的测试结果

压实厚度及铺料次数	碾压遍数	检测设备型号	检测深度/cm	层号	压实度/%									检测点数	合格点数	合格率/%
					测点①	测点②	测点③	测点④	测点⑤	测点⑥	最大值	最小值	平均值			
1#仓碾压层厚100 cm,分2次铺料	2+8+2	MC-4	30	A	98.9	98.9	98.5	99.0	98.1	98.2	99.0	98.1	98.6	6	6	100.0
		MC-S-24	50	A	101.2	100.3	96.2	98.1	96.2	101.4	101.4	96.2	98.9	6	4 3	50.0
			60	A	97.7	0.0	94.4	97.5	96.6	99.5	99.5	94.4	97.1	5	5 2	40.0
		大型表面	50	A	101.9	99.2	98.6	98.8	102.4	98.7	102.4	98.6	99.9	6	5 6	100.0
		轻便式	50	A	98.7	97.9	97.9	100.8	99.8	101.2	101.2	97.9	99.4	6	6	100.0
			75	A	97.8	94.9	95.1	100.8	95.4	101.5	101.5	94.9	97.6	6	3	50.0
			95	A	95.0	93.0	95.5	99.5	92.2	100.0	100.0	92.2	95.9	6	2	33.3
	2+10+2	MC-4	30	B	98.4	97.4	97.2	98.1	98.7	98.9	98.9	97.2	98.1	6	6	100.0
		MC-S-24	50	B	98.5	107.3	98.8	99.6	100.1	100.6	107.3	98.5	100.8	6	6	100.0
			60	B	97.9	110.0		99.7			110.0	97.9	102.5	3	3	100.0
		大型表面	50	B	99.4	97.0	94.9	97.3	99.3	100.6	100.6	94.9	98.1	6	5	83.3
		轻便式	50	B	95.5		99.8	97.5	97.7	99.1	99.8	95.5	97.9	5	4	80.0
			75	B	97.3		97.0	94.9	97.3	98.2	98.2	94.9	96.9	5	4	80.0
			95	B	95.4		96.9		95.9	95.1	96.9	95.1	95.8	4	0	0.0
	2+12+2	MC-4	30	C	99.1	98.3	99.3	100.0	98.8	99.5	100.0	98.3	99.2	6	6	100.0
		MC-S-24	50	C	96.0	98.9	100.4	101.3	103.0	98.0	103.0	96.0	99.6	6	5	83.3
			60	C				100.0		98.6	100.0	98.6	99.3	2	2	100.0
		大型表面	50	C	94.3	96.2	99.2	99.3	100.9	97.0	100.9	94.3	97.8	6	4	66.7
		轻便式	50	C	96.9	99.1	98.0	100.6	99.0	100.8	100.8	96.9	99.1	6	5	83.3
			75	C	98.5	99.4	95.4	97.9	96.2	98.7	99.4	95.4	97.7	6	4	66.7
			95	C	95.6		94.6	96.6	94.6	98.0	98.0	94.6	95.9	5	1	20.0

注：MC-S-24仪器棒的长度60 cm，开孔后，不能插入孔内，不能到达地面以下60 cm的深处，该测定中止。

度平均值轻便型测值为98.0%；碾压参数2-10-2，测点深度在70 cm时，压实度平均值轻便型测值为98.2%。都超过规范97%，说明层厚75 cm的碾压混凝土，碾压参数2-8-2也满足要求。

4.2.3 100 cm层厚

碾压参数2-8-2，测点深度在50 cm时，压实度平均值大型表面测值99.9%，轻便型测值为99.4%，MC-S-24测值98.4%；碾压参数2-10-2，测点深度在50 cm时，压实度平均值大型表面测值98.1%(54 cm的2层铺料，以下简称“2层”)~101.1%(27 cm的4层铺料，以下简称“4层”)，轻便型测值为97.8%(2层)~99.4%(4层)；碾压参数2-12-2，测点深度在50 cm时，压实度平均值大型表面测值97.8%(2层)~100.3%(4层)，轻便型测值为99.1%(2层)~99.6%(4层)；MC-S-24测值100.3%(4层)；碾压参数2-8-2，测点深度在75 cm时，压实度平均值，轻便型测值为97.6%；MC-S-24(60 cm)测值97.1%；碾压参数2-10-2，测点深度在75 cm时，压实度平均值，轻便型测值为96.9%(2层)~96.5%(4层)；MC-S-24(测深60 cm)测值102.5%(2层)~100.6%(4层)；碾压参数2-12-2，测点深度在75 cm时，压实度平均值大型表面测值97.8%(2层)~100.3%(4层)，轻便型测值为97.7%(2层)~96.9%(4层)；MC-S-24(测深60 cm)测值99.3%(2层)~100.7%(4层)。说明层厚100 cm的碾压混凝土，测点深度50 cm、75 cm，碾压参数2-8-2也满足要求。

100层厚碾压参数进行三组2-8-2、2-10-2、2-12-2试验，因只有轻便型可检测95 cm深，没有对比，压实度平均值为95.9%(2层)~96.8%(4层)，都没满足规范97%要求。

要说明轻便型密度仪测试，首先要把直径45 mm套管打入测试碾压混凝土中，施工难度大，多数孔打不到95 cm深度，有的打入时间太长，对测试精度有影响。

表8 第三试验块碾压遍数和各密度仪测定到的结果的比较

工区编号	层厚/cm	碾压遍数(静压+振动+静压)	密度仪	测定深度/cm	压实度/%			标准偏差/%	测定数	合格数	合格率/%
					平均	最大	最小				
1#	100	2+8+2	MC-4(8)	30	98.6	99.0	98.1	0.4	6	6	100
			MC-24(8)	50	98.9	101.4	96.2	2.4	6	3	50
				60	97.1	99.5	94.4	1.9	5	2	40
			大型表面(8)	50	99.9	102.4	98.6	1.7	6	6	100
			轻便式(8)	50	99.4	101.2	97.9	1.4	6	6	100
				75	97.6	101.5	94.9	3.0	6	3	50
				95	95.9	100.0	92.2	3.3	6	2	33
		2+10+2	MC-4(10)	30	98.1	98.9	97.2	0.7	6	6	100
			MC-24(10)	50	100.8	107.3	98.5	3.3	6	6	100
				60	102.5	110.0	97.9	6.5	3	3	100
			大型表面(10)	50	98.1	100.6	94.9	2.1	6	5	83
			轻便式(10)	50	97.9	99.8	95.5	1.7	5	4	80
				75	96.9	98.2	94.9	1.2	5	4	80
				95	95.8	96.9	95.1	0.8	4	0	0
		2+12+2	MC-4(12)	30	99.2	100.0	98.3	0.6	6	6	100
			MC-24(12)	50	99.6	103.0	96.0	2.5	6	5	83
				60	99.3	100.0	98.6	1.0	2	2	100
			大型表面(12)	50	97.8	100.9	94.3	2.4	6	4	67
			轻便式(12)	50	99.1	100.8	96.9	1.5	6	5	83
				75	97.7	99.4	95.4	1.6	6	4	67
				95	95.9	98.0	94.6	1.4	5	1	20

4.3 三种检测设备试验实践评价

三种检测设备在现场都进行了率定。

在测深30 cm检测中，MC-4核子水分密度仪与MC-S-24双管分层核子密度仪、大型表面透过型RI密度仪和轻便型1孔式RI密度仪进行了对比测试，结果表明：同一测点3种仪器测值与MC-4有很小差异相关性很好。

在测深50 cm检测中，MC-S-24双管分层核子密度仪、大型表面透过型RI密度仪和轻便型1孔式RI密度仪进行了对比测试，结果表明：同一测点3种仪器测值(除个别异常点外)有很小差异相关性很好。

在测深75 cm检测中，MC-S-24双管分层核子密度仪(测深60 cm)和轻便型1孔式RI密度仪进行了对比测试(测深70 cm)，因测深不同无法对比分析。

在测深100 cm检测中，只有轻便型1孔式RI密度仪进行了测试(测深95 cm)。

通过对比测试结果表明：MC-S-24双管分层核子密度仪、轻便型1孔式RI密度仪和大型表面透过型RI密度仪检测50 cm层厚碾压混凝土密实度精度满足要求；轻便型1孔式RI密度仪可以检测75~100 cm层厚碾压混凝土密实度。但从适用、轻便和操作简单来讲：MC-S-24双管分层核子密度仪，可自行选择测试单位，读数直观，仪器重21.2 kg，双管插入要用导向板人工打双孔，两孔易产生偏离；大型表面透过型RI密度仪，测试数据要经换算成密实度，读数不直观，单孔测试操作简便，重量15 kg；轻便型1孔式RI密度仪，测试数据要经换算成密实度，读数不直观，单孔要事先人工打入钢套管测试，钢套管增大测试成本，钢套管打入费力，操作复杂，重量10 kg。

上述表明：三种仪器经过对比试验实践检验，都需要进一步改进以适应施工现场测试要求。

4.4 本次试验存在的不足

(1)混凝土拌和设备容量不足，致使碾压混凝土摊铺时间过长，*VC*值变化较大影响碾压质量。

(2)试验采用河砂细度模数较大且细粉料偏少，混

表 9　第四试验块各测点的测试结果

压实厚度及铺料次数	碾压遍数	检测设备型号	检测深度/cm	层号	压实度/%									检测点数	合格点数	合格率/%
					测点①	测点②	测点③	测点④	测点⑤	测点⑥	最大值	最小值	平均值			
4# 仓层厚 100 cm，分 4 次铺料	2+10+2	MC-4	30	H	97.8	98.0	97.0	98.5	97.9	97.9	98.5	97.0	97.9	6	6	100.0
		MC-S-24	50	H	0.0	98.3	99.7	100.1	101.7	99.2	101.7	98.3	99.8	5	5	100.0
			60	H	0.0	100.4	99.4	103.1	100.8	99.4	103.1	99.4	100.6	5	5	100.0
		大型表面	50	H	98.3	99.9	101.0	104.3	103.0	100.3	104.3	98.3	101.1	6	6	100.0
		轻便式	50	H	98.5	100.6	98.3	100.4	99.4	99.3	100.6	98.3	99.4	6	6	100.0
			75	H	96.2	98.3	95.1	96.1	97.0	96.2	98.3	95.1	96.5	6	2	33.3
			95	H	97.1	94.1	95.1	95.5	95.9	93.3	97.1	93.3	95.2	6	1	16.7
	2+12+2	MC-4	30	I	98.7	98.9	98.7	98.7	99.8	98.3	99.8	98.3	98.9	6	6	100.0
		MC-S-24	50	I	99.8	99.6	99.4	100.7	101.7	100.8	101.7	99.4	100.3	6	6	100.0
			60	I		100.9	101.4	98.7	101.9	100.5	101.9	98.7	100.7	5	5	100.0
		大型表面	50	I	98.6	98.8	101.1	97.6	103.8	102.0	103.8	97.6	100.3	6	6	100.0
		轻便式	50	I	100.1	100.7	100.1	99.6	98.8	98.5	100.7	98.5	99.6	6	6	100.0
			75	I	96.7	98.9	95.9	96.4	94.8	98.8	98.9	94.8	96.9	6	2	33.3
			95	I	96.4	98.9	94.9	98.1	95.5	97.1	98.9	94.9	96.8	6	3	50.0

表 10　第四试验块碾压遍数和各密度仪测定结果的比较

工区编号	层厚/cm	碾压遍数(静压+振动+静压)	密度仪	测定深度/cm	压实度/%			标准偏差/%	测定数	合格数	合格率/%
					平均	最大	最小				
4#	100	2+10+2	MC-4(10)	30	97.9	98.5	97.0	0.5	6	6	100
			MC-24(10)	50	99.8	101.7	98.3	1.3	5	5	100
				60	100.6	103.1	99.4	1.5	5	5	100
			大型表面(10)	50	101.1	104.3	98.3	2.2	6	6	100
			轻便式(10)	50	99.4	100.6	98.3	0.9	6	6	100
				75	96.5	98.3	95.1	1.1	6	2	33.33
				95	95.2	97.1	93.3	1.3	6	1	16.67
		2+12+2	MC-4(12)	30	98.9	99.8	98.3	0.5	6	6	100
			MC-24(12)	50	100.3	101.7	99.4	0.9	6	6	100
				60	100.7	101.9	98.7	1.2	5	5	100
			大型表面(12)	50	100.3	103.8	97.6	2.4	6	6	100
			轻便式(12)	50	99.6	100.7	98.5	0.8	6	6	100
				75	96.9	98.9	94.8	1.6	6	2	33.33
				95	96.8	98.9	94.9	1.5	6	3	50

凝土的和易性较差，有泌水现象。

(3)试验期间气温较高 17~28 ℃，大部分超 21 ℃，没有采取相应措施，影响碾压混凝土质量。

(4)测试仪器造孔复杂困难时间较长，影响测试精度。

(5)试验后期钻孔取芯样，采用 100 cm 套管取三级配碾压混凝土不符合规范要求，影响芯样质量。

本文测试数据引自广东水电二局股份有限公司马堵山水电站工程 RCC 厚层碾压工艺现场试验成果。

参考文献：

[1] Tsukimoto Y, Iwakuma H, Chunmin L, et al. Vertical Vibratory Roller for Rapid Construction of RCC Dams[A]. Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams[C]. Pro. of the 5th Int. Guiyang, China, 2007, 753-760.

[2] Chunmin L, Shunkun L. Compaction Test in side for Thick layer for RCC for Huanghauazhai Hydropower Station[A]. Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams[C]. Pro. of the 5th Int. Guiyang, China, 2007, 679-686.

(责任编辑　陈小敏)

中华人民共和国水利部主管
全国中文核心期刊

ISSN 1000-0860
CN 11-1757/TV

水利水电技术

WATER RESOURCES AND HYDROPOWER ENGINEERING

浙江碗窑水库

奥林匹克公园的水空间

水利工程前期工作现状及存在的突出问题

论混凝土坝抗震设计与计算中混凝土动态弹性模量的合理取值

预应力钢筒混凝土管（PCCP）的计算方法

重力坝加高中新老混凝土结合面开合若干问题探讨

南水北调中线工程西甘池试验洞收敛变形反分析

ISSN 1000-0860
9 771000 086028 11

2009 11
Vol.40 No.11