

现代碾压混凝土快速筑坝关键技术

(江油市沉水工程讲座)

中国水力发电工程学会RCC筑坝专委会

中国大坝工程学会理事

田育功

2022年5月7日

讲座提要

1. 现代碾压混凝土坝技术发展
2. 沉水碾压混凝土重力坝工程简介
3. 碾压混凝土原材料控制关键技术
4. 碾压混凝土施工配合比设计关键参数
5. 碾压混凝土快速施工关键技术
6. 变态混凝土施工关键技术
7. “层间结合、温控防裂”核心技术
8. 抗冲磨混凝土与RCC同步浇筑技术

1. 现代碾压混凝土坝技术发展

1.1 现代碾压混凝土坝技术发展

碾压混凝土坝是世界坝工史上的一次重大技术革命和创新，碾压混凝土坝已成为混凝土坝的主流坝型之一。中国的碾压混凝土坝是在引进、消化的基础上不断创新发展，1986年中国开始的碾压混凝土坝主要采用国际上传统的“金包银”方式。1993年普定碾压混凝土坝开创了全断面碾压混凝土筑坝技术的先河，这是中国对现代碾压混凝土坝的最大贡献，是中国在碾压混凝土筑坝技术发展中独具特点和具有知识产权的新材料、新工艺、新技术。

此后，国际碾压混凝土坝也逐步采用全断面碾压混凝土筑坝技术和变态混凝土技术。现代碾压混凝土坝依靠自身防渗，有效提高了坝体的防渗性能、简化了施工、加快了工程进度、缩短了工期，符合现代碾压混凝土坝高质量、短工期和低成本发展的三个主要目标。最能反映现代碾压混凝土坝的是超级芯样，超过20m芯样屡见不鲜，见大坝照。

2018年4月建成的203m黄登RCC重力坝



2006年施工中的192m龙滩RCC重力坝



2007年施工中的200.5m光照RCC重力坝



2012年建成的160m高金安桥RCC重力坝



2004年建成130m百色RCC重力坝



2001年建成111m棉花滩重力坝





2019年105m广西瓦村RCC重力坝

右岸非溢流坝段 泄洪闸坝段 左岸非溢流坝段

溢流中孔

升船机

尾水渠

● 1997年12月1日

1.2 现代碾压混凝土坝定义内涵

(1) 现代水工碾压混凝土坝定义内涵

中国2004年发布实施的《碾压混凝土坝设计规范》SL314-2004条文说明4.0.1：“碾压混凝土与常态混凝土相比主要是改变了混凝土材料的配合比和施工工艺，而碾压混凝土重力坝的工作条件和工作状态与常态混凝土重力坝基本相同”。由于碾压混凝土已经成为无坍落度的亚塑性混凝土，其硬化后的性能与常态混凝土性能相同，符合混凝土“水胶比”定则，故碾压混凝土坝的断面设计与常态混凝土坝相同。

所以现代水工碾压混凝土应确切定义为：“水工碾压混凝土是指将无坍落度的亚塑性混凝土拌和物分薄层摊铺并经振动碾碾压密实且层面全面泛浆的混凝土”。

(2) 国际全碾压混凝土坝定义内涵

2013年国际大坝委员会对第126号公告进行了更新修订，更新修订的《碾压混凝土坝》全新定义：“高水泥含量、超缓凝、全碾压混凝土坝的建设已经发展出一套成熟的施工方法，保障了高效、快速、低成本和高质量混凝土坝的修建”。同时国际大坝委员会最新的第177号（2019）公告，明确了碾压混凝土中的变态混凝土（IVRCC）、富浆混凝土（BEMCC）、插入式振捣混凝土（可振可碾混凝土）的施工。

美国陆军工程设计规范《碾压混凝土》EM 1110-2-2006条款1-4美国混凝土学会（ACI）将碾压混凝土定义为“一种用碾压方法压实的混凝土，在其未硬化状态，能支撑压实施工时使用的碾压设备。硬化后的碾压混凝土与常规浇筑混凝土的特性相似”。国际标准明确了现代碾压混凝土与常态混凝土相似特性，确立了全碾压混凝土坝的施工方法。见芯样照



龙滩RCC芯样



光面RCC芯样



金安桥玄武岩骨料RCC芯样



向家坝灰岩骨料超长RCC芯样



院士察看向家坝RCC芯样





莽山20.7m及15.4m超长芯棒



丰满23.18m三级配超级芯样



三河口25.2Mm、22.6m超級芯样



黄登24.6m二级配超级芯样



丰满23.18m三级配超级芯样





乌龙弄25.9m RCC超级芯样



西藏大古26.2m RCC芯样世界之最

NOVA 7 SE 5G
AI QUAD CAMERA

黄藏寺RCC生产性试验芯样气孔多、层缝明显







广西瓦村掺聚羧酸减水剂三级配RCC芯样



RCC大坝廊道渗漏十分严重

RCC层间结合直接关系到大坝的防渗性能

2 沉水碾压混凝土重力坝工程简介

2.1 沉水碾压混凝土重力坝

沉水RCC重力坝坝顶高程758.7m，建基面693.0m，最大坝高65.7m，坝顶长132.0m。大坝左至右共分7个坝段，1#~2#为非溢流坝段（27.0m），3#为放空底孔（导流底孔）（17.0m）坝段，4#为3孔溢流表孔坝段（24.2m），5#为取水口坝段（18.5m），6#、7#为非溢流坝段（均为25.5m）。

上游坝坡铅直，下游坝坡1：0.08。坝内布置两层廊道，为帷幕灌浆廊道和排水廊道。

沉水大坝材料分区及碾压混凝土设计指标：上下游面防渗区二级配富胶凝RCC，设计指标C₁₈₀20W6F100；坝体内部三级配RCC，设计指标C₁₈₀20W4F50。模板周边、廊道周边、坝坡等部位采用变态混凝土。

碾压砼坝导流底孔剖面图

1:500

RCC重力坝上游立视图



3 碾压混凝土原材料关键技术

3.1 石粉含量是提高层间结合质量关键措施之一

《水工碾压混凝土施工规范》DL/T5112-2009条款：5.5.9 人工砂的石粉（ $d \leq 0.16\text{mm}$ 的颗粒）含量宜控制在12%~22%，其中 $d < 0.08\text{mm}$ 的微粒含量不宜小于5%。最佳石粉含量应通过试验确定”。条文说明5.5.9进一步阐述：通过工程实践及试验证明，人工砂中适当的石粉含量，能显著改善砂浆及混凝土的和易性、保水性，提高混凝土的匀质性、密实性、抗渗性、力学指标及断裂韧性。石粉可用作掺合料，替代部分粉煤灰。合理控制人工砂石粉含量，是提高层间结合质量的重要措施之一。

大量的试验研究和工程实践表明，当石粉含量控制在18%~20%时可以显著提高浆砂比PV值，改善碾压混凝土可碾性、液化泛浆、层间结合质量和坝体防渗性能。石粉最大的贡献是提高了浆砂体积比PV值。

3.2最佳石粉含量控制技术措施

①**金安桥外掺石粉代砂控制技术**。金安桥RCC玄武岩人工砂石粉含量平均12.7%，采用外掺石粉代砂技术，提高石粉含量至18%~19%，有效改善RCC的工作性能。外掺石粉为水泥厂加工的灰岩石粉，细度按Ⅱ级粉煤灰控制。

②**百色石粉替代粉煤灰技术**。百色RCC辉绿岩人工砂石粉含量达到22%~24%，对大于20%以上的石粉采用替代粉煤灰 $24\text{kg}/\text{m}^3 \sim 32\text{kg}/\text{m}^3$ ，解决了石粉含量过高和超标的难题，成果获2005年中国电力科学技术奖。

③**光照粉煤灰代砂技术**。光照大坝RCC灰岩骨料人工砂石粉含量在15%左右波动，达不到最佳石粉含量18%是要求，采用粉煤灰代砂技术措施，该方案操作方便简单，有效解决了人工砂石粉含量不足的问题，提高了可碾性和层间结合质量。

A large, conical pile of light-colored artificial sand is the central focus of the image. The sand is piled high, reaching towards the ceiling of a warehouse. The background shows the structural elements of the warehouse, including metal beams and a corrugated metal roof. The lighting is somewhat dim, with the sand appearing as a bright, textured surface.

百色RCC高石粉含量辉绿岩人工砂

2003/11/09

百色RCC高石粉含量芯样致密光滑



百色RCC高石粉含量芯样致密光滑

2003/11/09

沉水拌和樓石英人工砂料倉



3.3 外加剂关键技术

碾压混凝土均掺外加剂，外加剂主要采用缓凝高效减水剂（缓凝剂）+引气剂复合应用，碾压混凝土不论寒冷、温和和亚热带地区，均设计有抗冻等级，故碾压混凝土均掺引气剂。引气剂掺量往往是常态混凝土10倍~30倍之多。

凝结时间是拌和物重要性能，直接关系到可碾性，要求初凝时间控制16:00h~20:00h、终凝时间32:00h~36:00h范围，成功解决了层间结合连续碾压上升的难题，是现代碾压混凝土拌和物的一个重要特性。

国际现代碾压混凝土要求初凝时间20:00h~24:00h，终凝时间40:00h~48:00h，这是现代碾压混凝土高和易性拌和物的典型特征，可以保证在下层表面开始初凝之前连续浇筑。

2. 技术要求 4 RCC施工配合比设计关键技术

混凝土（砂浆）配合比技术要求见大坝混凝土技术要求

江油市沉水水库大坝标土建及安装工程（二次招标）碾压混凝土（砂浆）设计指标

表 1-1

项目	强度等级	抗渗等级	抗冻等级	极限拉伸值 ($\times 10^{-4}$)	强度保证率	级配	坍落度/ (稠度) (mm)	VC 值 (s)	使用部位	备注
1	C ₁₈₀ 20	W6	F100	90	90%	二	/	2~8	上、下游面层	碾压
2	C ₁₈₀ 15	W4	F50	80	80%	三	/	2~8	坝体内（III区）	碾压
3	M ₁₈₀ 20	W4	F50	80	80%	/	120~140	/	接缝砂浆	/
4	M ₁₈₀ 25	W6	F100	90	90%	/	120~140	/	接缝砂浆	/

注：上表中碾压混凝土粉煤灰掺量三级配按 60%、二级配按 50%选择。

4.1 沉水大坝碾压混凝土施工配合比表

推荐碾压混凝土（接缝砂浆）施工配合比表

表 6-1

序号	使用部位	技术指标	配合比									
1	坝体内(III区)	C ₁₅ 15 W4F50	配合比参数	级配	VC 值(s)	水胶比	砂率 (%)	煤灰掺比 (%)	减水剂掺比 (%)			引气剂掺比 (%)
				三	2~8	0.53	35	60	1.50			1.20
			每 m ³ 用量 (kg)	水	水泥	粉煤灰	人工砂	5-20mm 碎石	20-40mm 碎石	40-80mm 碎石	减水剂	引气剂
				89	67	101	768	499	499	428	2.520	2.016
2	上、下游面层	C ₂₀ 20 W6F100	配合比参数	级配	VC 值(s)	水胶比	砂率 (%)	煤灰掺比 (%)	减水剂掺比 (%)			引气剂掺比 (%)
				二	2~8	0.47	39	50	2.00			1.20
			每 m ³ 用量 (kg)	水	水泥	粉煤灰	人工砂	5-20mm 碎石	20-40mm 碎石	40-80mm 碎石	减水剂	引气剂
				93	99	99	842	658	658	/	3.960	2.376
3	接缝砂浆	M ₂₀ 20 W4F50	配合比参数	级配	稠度 (mm)	水胶比	砂率 (%)	煤灰掺比 (%)	减水剂掺比 (%)			引气剂掺比 (%)
				/	120~140	0.53	/	55	2.00			0.025
			每 m ³ 用量 (kg)	水	水泥	粉煤灰	人工砂	5-20mm 碎石	20-40mm 碎石	40-80mm 碎石	减水剂	引气剂
				222	188	230	1468	/	/	/	8.360	0.104

4.2 RCC配合比技术路线与浆砂比PV值

科学合理的配合比在RCC快速施工中占有举足轻重的作用，具有较高的技术含量，直接关系到快速筑坝的成功与否，可以起到事半功倍的作用，是RCC快速筑坝的关键技术之一，可以获得明显的技术经济效益。

全断面RCC筑坝技术配合比设计采用“两低、两高、两掺”技术路线已成熟，即低水胶比、低VC值，高粉煤灰掺量、高石粉含量，掺缓凝高效减水剂和引气剂。其中浆砂比PV值是RCC配合比设计的关键参数，具有与水胶比、砂率、用水量三大参数同等重要的作用。

浆砂比PV值是灰浆体积(包括0.08mm微细颗粒)与砂浆体积的比值。实践表明，当人工砂石粉含量控制在18%以上时，一般浆砂比PV值不小于0.42，可以有效提高层间结合质量，是评价RCC拌和物性能的重要指标

4.3 VC值是可碾性控制的关键参数

DL/T5112-2009规范条文：6.0.4 RCC拌和物的VC值现场宜选用2s~12s。机口VC值应根据施工现场的气候条件变化，动态选用和控制，宜为2s~8s”。

规范条文说明6.0.4进一步阐述：VC值的大小对RCC的性能有着显著的影响，在满足现场正常碾压的条件下，VC值可采用低值。**VC值的控制以RCC全面泛浆和具有弹性，经碾压能使上层骨料嵌入下层混凝土为宜”。**

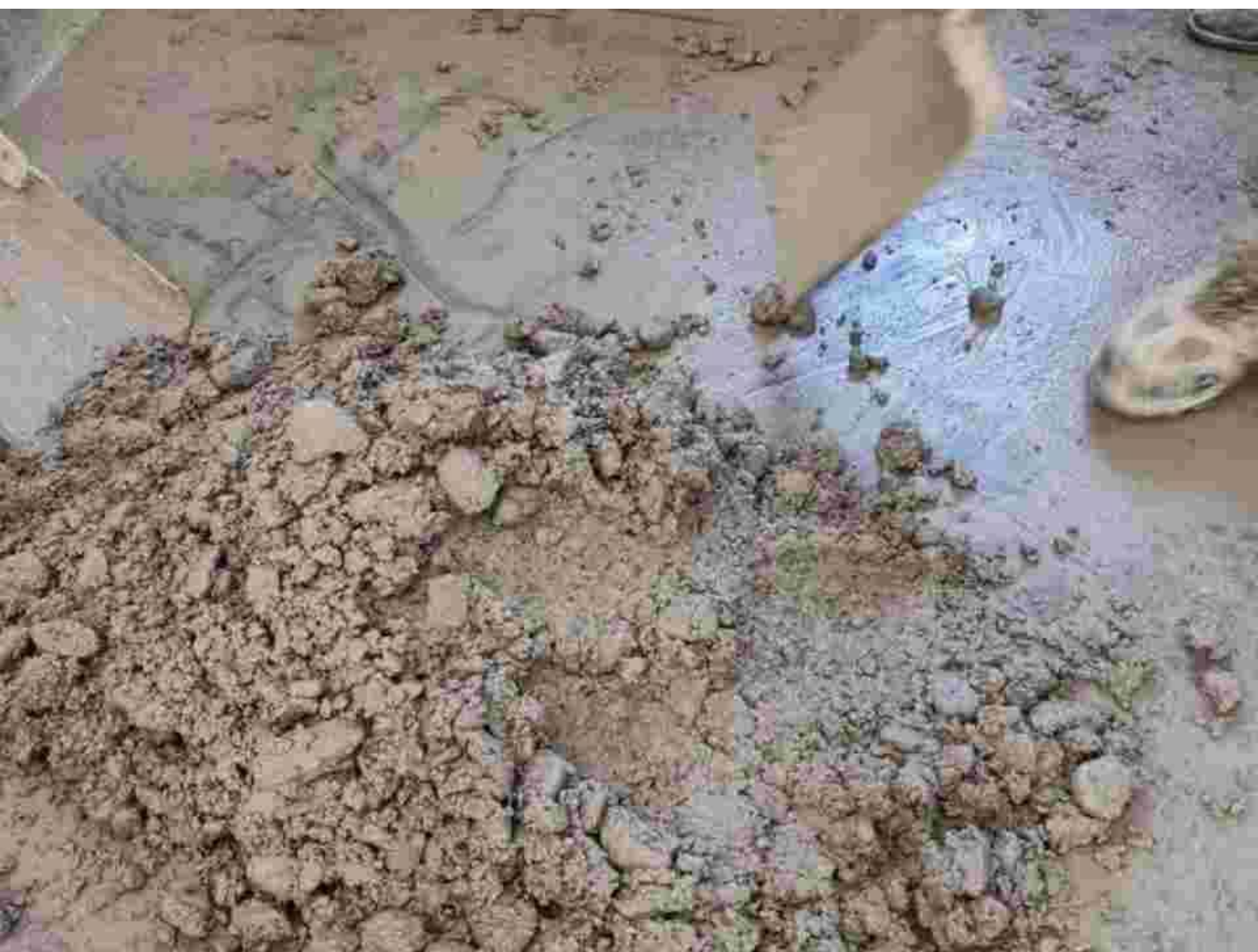
现场控制的重点是VC值和凝结时间，VC值和凝结时间是RCC可碾性和层间结合的关键，应根据气温条件的变化及时调整出机口VC值。

例如百色、龙滩、金安桥、黄登、大古等工程，当气温超过25℃时VC值大都采用1s~5s。由于采用较小的VC值，使RCC入仓至碾压完毕有良好的可碾性，并且在上层RCC覆盖以前，下层RCC表面仍能保持良好塑性。

4.4 VC值、凝结时间与外加剂掺量动态控制技术

VC值、凝结时间与外加剂掺量有着密切的关系。大量工程实践表明，高温气候时段或夏季，根据不同时段的气温采用不同的外加剂掺量，保持RCC配合比参数不变，在提高外加剂掺量减小VC值的叠加作用下，延长了RCC凝结时间，此方法简单易行，是解决高温气候条件下VC值动态控制行之有效的技术措施。研究表明：外加剂掺量每增加0.1%，初凝时间约延长30min；VC值每减小1s，RCC初凝时间相应延长约20min。

工程实例：百色、金安桥、喀腊塑克、苏阿皮蒂等工程根据气温条件，保持配合比参数不变，当气温低于25℃时，外加剂掺量0.8%不变；当气温大于25℃时，减水剂掺量提高至1.0%；当气温大于28℃或30℃且在曝晒的情况下，外加剂掺量提高至1.2%~1.5%，有效解决了高温气候条件下RCC表面容易发白、不易泛浆和层间结合质量差的难题。









巴基斯坦达苏RCC拌和物VB值试验照

(VC值与VB值不同，配重不同)



光照大坝RCC第一次工艺试验

大坝RCC工艺试验场

26.08.2005



光照RCC第一次工艺试验表明未泛浆

26.08.2005

光面大綱RCC第一次工藝試驗干層餅芯樣圖





光照大坝RCC第二次工艺试验





光明HGO第二次工艺试验全面泛浆有弹性



光照RCC第二次工艺试验碾压后全面泛浆有弹性



黄登三级配RCC配合比调整试验V0值照



黄登调整后三级配RCC全面泛浆照



黄登调整后三級配RCC全面泛漿有彈性照



黃登三級配骨料ACC施工照



黄登调整后三级配RCC全面泛浆有弹性

丰满三级配RCC全面泛浆照







西藏大古调整后仓面三级配RCC全面泛浆有弹性

5 碾压混凝土快速施工关键技术

5.1 沉水碾压混凝土施工现状及难点

2017年时，大坝4#、5#、6#号坝段已浇筑至716.15m高程，距坝顶40.55m；3#号坝段浇筑至706.85m高程，距坝顶51.85m。随后工程停工并进行二次招标。根据绵阳市委、市政府对水利工程“退一进一”要求，沉水水库作为今年必须退出的项目，应于2022年6月底前完成大坝主体工程，2022年12月底前全面完工。”

沉水工程施工的重点是3#坝段应尽快到达与4#坝段一样高程。施工的难点主要是碾压混凝土运输入仓，一是受道路的制约，二是存在高差垂直入仓的困难。解决混凝土运输道路及入仓强度是本工程的难点和重点，需要认真研究。

同时做好仓面分区设计，主要以通仓浇筑和3m升层为主。







5.2 基岩面垫层同步浇筑要点分析

DL/T5112-2009规范规定：“基础块铺筑前，应在基岩面上先铺砂浆，再浇筑垫层混凝土或变态混凝土，也可在基岩面上直接铺筑小骨料混凝土或富砂浆混凝土。除有专门要求外，其厚度以找平后便于碾压作业为原则”。

条文说明7.1.4进一步阐述：在凹凸不平的基岩面上，不便于进行RCC的铺筑和碾压施工，因此应浇筑一定厚度的垫层混凝土或变态混凝土，达到找平的目的。

《水工混凝土施工规范》SL677及DL/T5144均对基岩或施工缝，均可以借助强度等级相当的小一级配混凝土、富浆混凝土。例如广西百色、几内亚苏阿皮蒂等RCC重力坝，采用基础垫层与RCC同步施工技术。有效加快了施工进度，提高了大坝的整体性能。

百色大坝基础垫层常态与RCC同浆施工态样



百色基础垫层常志与R00同步施工芯样



几内亚大坝基础垫层常态与RCC同步施工技术



几内亚大坝基础垫层常态与RCC同步施工技术



5.3 消除混凝土表面气孔关键技术

混凝土是典型的多相非均质材料，由于液体和气体的不可压缩性和挥发性特点，混凝土在振捣过程中总是保留一定的水分和空气，待硬化拆模后，表面产生大量的气孔现象。特别是大坝下游1:0.75反坡，更是增加了混凝土排气困难。

大量的工程实践证明，混凝土采用二次复振技术，是消除混凝土表明气孔行之有效的方法。例如白鹤滩泄洪洞抗冲磨混凝土浇筑，采用二次复振技术十分成功，有效消除了表面气孔，混凝土外观达到镜面效果。

见照片。



百色大坝悬臂翻升模板见照片

金安桥大坝装饰条翻升模板混凝土外观





6-26
2-17

振捣“定人、定岗”防漏振、过振

浇筑过程全程高清摄像

边墙衬砌工艺参数表

采用两次振捣工艺			
项目	振捣棒	振捣间距	时间
初振	Φ100	40cm	40s
间隔时间	20min		
复振	Φ100	40cm	20s

自强不息 勇于超越

5.3 拌和关键技术

DL/T5112-2009规范规定：碾压混凝土的拌和时间、投料顺序、拌和量，都应通过现场混凝土拌和均匀性检验确定。

强制式搅拌机投料顺序对碾压混凝土拌和物均匀性会产生较大的影响。分析认为，由于强制式搅拌机搅拌叶片与钢壁存在一定的间隙，采用先拌制砂浆的投料顺序，可以起到对间隙的润滑作用。

沉水碾压混凝土生产性工艺试验应进行拌和投料顺序、拌和时间工艺试验，以确定最佳拌和时间、投料顺序、拌和量等。

需要研究拌和生产强度，如何控制出机口混凝土温度，控制浇筑温度，最高温升，防止大坝裂缝发生。





5.4 汽车直接入仓是最有效的方式

大量的工程施工实践证明，汽车直接入仓是快速施工最有效的方式。可以极大的减少中间环节，减少温度回升倒灌。

针对高山峡谷的地形特点，碾压混凝土中间环节垂直运输经历了多种运输设备。大量的工程实践表明，汽车+满管溜槽+仓面汽车的联合运输入仓方式是投入最少、最简单快捷和最有效的运输入仓方式。满管溜槽的断面尺寸已经达到80cm×80cm，下倾角一般45°～50°，仓外汽车通过卸料斗经满管溜槽直接把料卸入仓面汽车中，倒运十分简捷快速。由于现在的碾压混凝土为高石粉含量、低VC值的亚塑性混凝土，令人担忧的骨料分离问题也迎刃而解。

沉水工程在左岸应尽快进行满管溜槽安装，关键是提前浇筑1#坝段受料平台和卸料斗。



金安桥右岸满贯溜槽



黄登大坝联合运输
通过胶带机转+满管运
输+仓内自卸汽车转运





金安桥5#-6#坝段溜槽输送RCC

5.5 碾压速度、厚度及碾压遍数宜经过试验确定

DL/T5112-2009规范规定：振动碾行走速度应控制在1.0km/h~1.5km/h。施工中采用的碾压厚度及碾压遍数宜经过试验确定，并与铺筑的综合生产能力等因素一并考虑。根据气候、铺筑方法等条件，可选用不同的碾压厚度。碾压厚度不宜小于混凝土最大骨料粒径的3倍（最大80mm、三级配）。

条文说明7.6.4进一步阐述：不同振动碾所能压实的厚度不同，同一配合比的拌和物对于不同振动碾所需的压实遍数也不同。碾压厚度和碾压遍数可通过现场试验并结合生产系统的综合生产能力确定，施工中根据条件采用不同的碾压厚度，有利于满足对层间间隔时间的要求。

为了加快施工速度，减少层缝面，提高碾压厚度至40cm、50cm技术创新。

5.6 斜层碾压是缩短层间间隔时间的有效措施

DL/T5112-2009规范规定：碾压混凝土宜采用大仓面薄层连续铺筑，铺筑方法宜采用平层通仓法，也可采用斜层平推法。铺筑面积应与铺筑强度及碾压混凝土允许层间间隔时间相适应。采用斜层平推法铺筑时，层面不得倾向下游，坡度不应陡于1：10。

斜层碾压显著的优点就是在一定的资源配置情况下，可以把大仓面转换成面积基本相同的小仓面，这样可以极大的缩短碾压混凝土层间间隔时间，提高混凝土层间结合质量，特别是在气温较高的季节，采取斜层碾压施工方法效果更为明显。斜层坡脚采用铺洒灰浆可以有效解决坡脚薄弱难题。

根据大量工程的实践，斜层坡度控制在1：10~1：15时，即每层铺筑时水平方向碾压混凝土摊铺不少于3m或4.5m时，斜层坡度不会小于1：10或1：15。斜层碾压振动碾爬坡时速度较快，可不受速度限制，否则容易陷碾。

金安桥斜层碾压施工



苏阿皮蒂斜层碾压施工
及横缝切缝



斜层碾压坡脚铺洒灰浆





斜层碾压坡脚铺洒灰浆

5.7 横缝成缝要点

碾压混凝土坝与常态混凝土坝的最大区别是坝体构造不同，碾压混凝土坝不设纵缝，横缝采用切缝技术，施工现场人员稀少，施工具有豪迈大气的特点，且没有漏振现象发生。

碾压混凝土每碾压一层，横缝需采用切缝机切缝。大量工程实践表明“先碾后切”已成为主流切方式。切缝时直接把双层PVC填缝材料通过切缝机直接压入混凝土中，缝深和嵌缝材料不少于层厚的三分之二，剩余部分待混凝土自然拉裂。

采用“先碾后切”嵌缝材料完成后，应对缝口进行补碾收面。







切缝机切缝，填塞四层彩条布



切缝完成后，碾压机补碾

6. 变态混凝土关键技术

变态混凝土是中国采用全断面RCC筑坝技术的一项重大技术创新。变态混凝土是在RCC摊铺施工中，铺洒灰浆采用振捣器振捣密实而形成的富浆混凝土，所以变态混凝土实质是“加浆振捣混凝土”。

变态混凝土应随碾压混凝土浇筑逐层施工，铺料时宜采用平仓机辅以人工两次摊铺平整，灰浆宜洒在新铺碾压混凝土的底部和中部。也可采用切槽和造孔铺浆，不得在新铺碾压混凝土的表面铺浆。变态混凝土的铺层厚度宜与平仓厚度相同，用浆量经试验确定。

变态混凝土加浆量应根据具体要求经试验确定，与VC值大小有关，一般变态混凝土的加浆量约50L/m³左右。

施工条件允许，变态混凝土应尽量采用机拌变态混凝土，特别是防渗区止水部位采用机拌变态混凝土效果良好。近年来，碾压混凝土已经朝着可振可碾混凝土方向发展。（黄登变态混凝土案例）



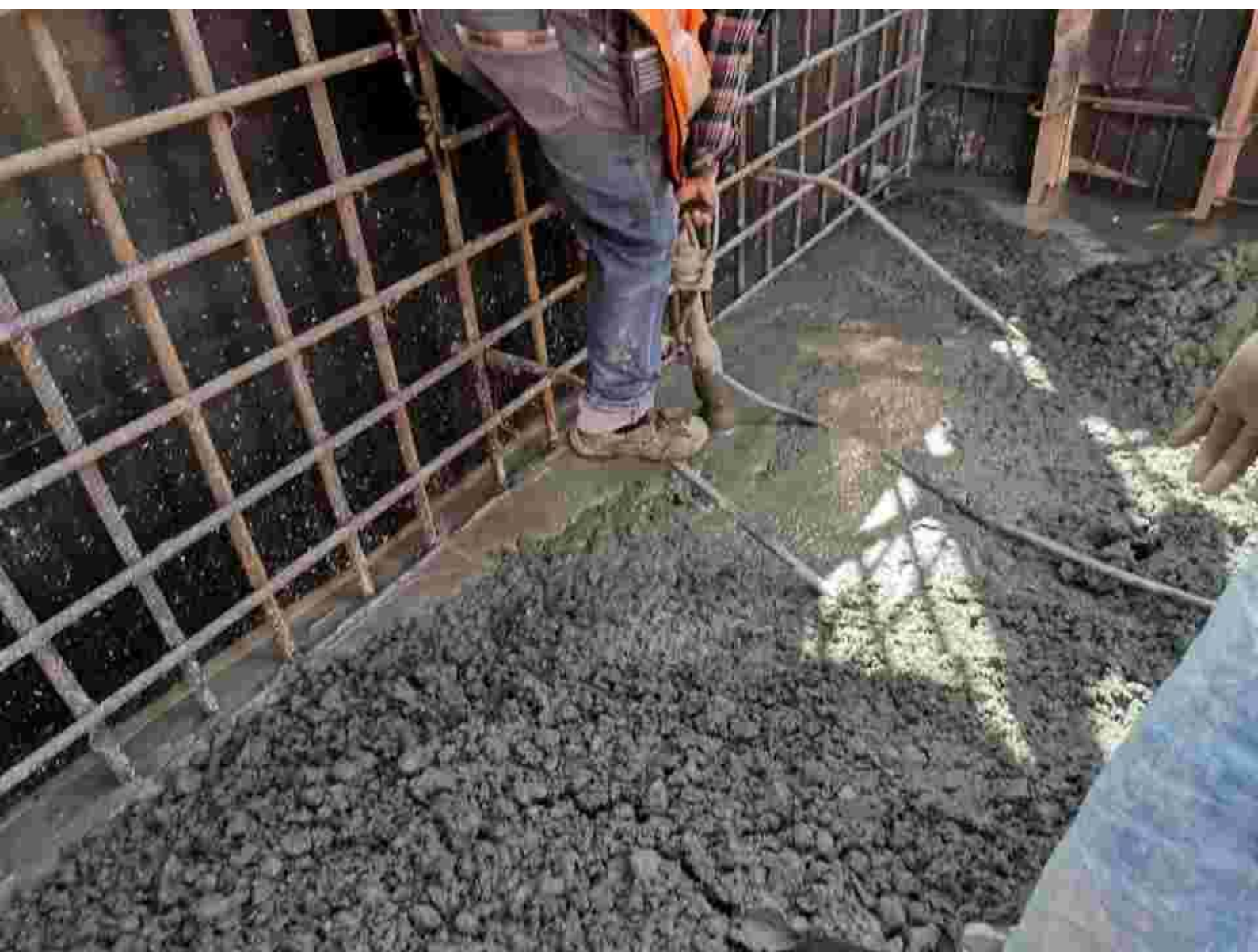


金安桥斜层碾压工艺













7、“层间结合、温控防裂”是RCC核心技术

7.1混凝土温控防裂是一项系统工程

混凝土坝是典型的大体积混凝土，裂缝是混凝土坝最普遍、最常见的病害之一，被称为混凝土癌症，多年来大坝的温度控制与防裂一直是坝工界所关注和研究的重大课题。混凝土坝温控防裂因素很多，从坝体混凝土裂缝机理、温控设计、构造分缝、材料分区、原材料控制、配合比设计优化、施工技术创新、温控防裂措施、温度自动化监测等关键技术分析表明分析，混凝土坝裂缝的产生不是由单一因素造成的，它的形成往往是由多种因素共同作用的结果，所以混凝土坝的温控防裂是一项系统工程。

混凝土坝的温控设计主要有坝体内外温差、最高温度、稳定温度、浇筑温度、出机口温度等，温度控制的目的是防止大坝产生裂缝。

7.2 沉水大坝碾压混凝土温度控制标准表

混凝土分区 项 目	基础强约束区 (0~0.2) L (高程716.15~ 723.15m)	基础弱约束区 (0.2~0.4) L (高程723.15~ 730.15m)	非基础约束区 0.4L以上 (高程730.15~ 758.7m)
砼允许最高温度	30.5	32.5	36
砼允许浇筑温度	21.0	23.8	25.5
浇筑时段	2022年5月	2022年6月	2022年7月~10月
温控措施	采用低水化热的水泥+加冰拌合+常规温控措施+通水冷却+混凝土表面保护和养护		

7.3 提高层间结合质量的关键技术

“层间结合、温控防裂”是RCC施工核心技术。RCC浇筑特点是薄层、通仓摊铺碾压施工，容易形成“千层饼”，其层缝面极易成为渗漏的通道。层间结合的质量问题一直是RCC快速筑坝研究的重要课题，为此DL/T5112-2009指出：VC值的控制以RCC全面泛浆和具有“弹性”，经碾压能使上层骨料骨料嵌入下层混凝土为宜。由于碾压混凝土层面受环境影响较为敏感，当气温过高，阳光辐射以及风较大时，表面极易失水发白，从而影响层间结合质量。

- 加强施工组织管理，做到快速入仓摊铺、及时碾压；
- VC值实行动态控制，在不陷碾的情况下，采用低VC值施工；
- 仓面采取喷雾保湿措施，控制混凝土温度回升，提高可碾性及层间结合质量。

7.4 控制浇筑温度的主要技术措施

(1) 降低混凝土出机口温度最有效的措施就是降低骨料温度，因为骨料约占混凝土质量的85%以上，对骨料进行降温主要采取风冷骨料措施，可将骨料温度降到5~10℃左右，可以有效控制新拌混凝土出机口温控。

(2) 在自卸汽车顶部设置遮阳篷，混凝土温度回升一般不超过1℃。自卸汽车返回拌和楼时，在拌和楼前对自卸汽车进行喷雾降温，不但给车箱降温，对防止混凝土温度回升效果良好。

(3) 仓面采取喷雾保湿措施，是降低仓面环境温度和降低混凝土浇筑温度回升十分重要的温控措施。一般浇筑温度上升1℃，坝内温度相应上升0.5℃。采用喷雾保湿可有效降低仓面温度4~6℃，对控制浇筑温度回升十分重要的措施。

(4) 通水冷却是控制坝体最高温升关键措施，控制最高温升，就控制了温差，防止裂缝发生。

7.5 喷雾保湿，降低仓面局部气温

DL/T5112-2009施工规范7.11.4条文规定：“高温季节施工，根据配置的施工设备的能力，合理确定碾压仓面的尺寸、铺筑方法，宜安排在早晚夜间施工，混凝土运输过程中，采用隔热遮阳措施，减少温度回升，采用喷雾等办法，降低仓面局部气温”。

在高温季节、多风和干燥气候条件下施工，RCC表面水分蒸发迅速，其表面极易发白和温度升高。采取喷雾保湿措施，可以使仓面上空形成一层雾状隔热层，是降低仓面环境温度和降低混凝土浇筑温度回升十分重要的温控措施，可有效降低仓面温度 $4\sim 6^{\circ}\text{C}$ ，对温控十分有利，一般浇筑温度上升 1°C ，坝内温度相应上升 0.5°C 。喷雾保湿是RCC层间结合和温度控制极其重要的环节和保证措施，决不能掉以轻心，将直接关系到大坝防渗性能和温控防裂。



高空喷雾形成仓面小气候



夏季混凝土面喷水养护



金安桥5#-6#坝段溜槽输送RCC





8. 抗冲磨混凝土与RCC同步浇筑技术

传统的泄水建筑物溢流面抗冲耐磨混凝土与坝体RCC一般分为二期施工。溢流面层高性能抗冲磨混凝土往往成为制约大坝施工进度的一个瓶颈，易形成两张皮现象。溢流坝段溢流面抗冲磨混凝土与RCC同步浇筑上升技术，抗冲磨混凝土表面的浆体是通过振捣从混凝土中提出的浆液，在模板的保护下，不会发生表面失水产生的干缩现象。

百色、光照、戈兰滩、喀腊塑克、黄登、丰满等工程均采用此施工方法，取得了成功经验。比如，戈兰滩大坝溢流坝段采用一次立模浇筑成型的施工工艺，溢流面与坝体RCC同期浇筑、同步上升而快速形成，节约工期3个月左右。同时，大坝混凝土施工减少了一次立模、一道缝面插筋和人工凿毛处理，从而有效简化了施工、降低了工程造价。



谢谢

