

# BCR (Béton CoMPacte au Rouleau) 型硬质填料配合比设计研究

作者：路名军<sup>1</sup> 仇玉生<sup>1</sup> 雍浩<sup>1</sup>

(1 中国水电建设集团十五工程局有限公司 陕西西安 邮编：710065)

**摘要：**BCR 型硬质填料坝与 CSG、胶结砂砾石坝均属于环境友好的新坝型，推广具有较强的社会意义。本文依托梅莱格大坝工程实践，对该工程 BCR 型硬质填料配合比设计进行了研究，主要研究配合比设计方法和在胶凝材料掺量固定、骨料中小于 0.08mm 颗粒含量的变化时，对硬质填料密度及抗压强度的影响情况。

**Abstract:** BCR-type hard-filled dams, CSG, and cemented sand-gravel dams are all environmentally-friendly new dam types, and their promotion has strong social significance. Relying on the engineering practice of Meleg Dam, this paper studies the design of the BCR hard filler mix ratio for this project, mainly studying the mix ratio design method and the fixed amount of cementitious material, and the change of particle content less than 0.08mm in the aggregate. When, the impact on the density and compressive strength of hard fillers.

**关键词：**配合比设计方法 土工法 硬质填料(BCR) 胶结砂砾料 CSG

## 1. 研究背景

### 1.1 大坝概况

突尼斯梅莱格大坝位于突尼斯卡夫省西北部，距离卡夫 13 公里。枢纽工程主要作用是灌溉和防洪。主坝坝高 68m，坝顶长度 432m，大坝断面对称型布置，上游和下游坡比均为 1:0.6，坝体填筑材料为 BCR 型硬质填料，填筑量约 60 万 m<sup>3</sup>。大坝上游为钢筋混凝土面板防渗，面板厚度为 0.35m。坝后为“L”型预制块防，坝体内从左岸到右岸设置连通的排水廊道。

### 1.2 关键技术指标

该工程依据的技术标准为欧美标准，在合同文件中明确了硬质填料的控制标准，具体如下：

- (1) 90 天龄期  $f_{c90} = 7 \text{ MPa}$  (高径比为 1；高径比为 2 时，大约 6 MPa)。
- (2) 体积重量：22 kN/m<sup>3</sup> (测量不饱和样品)。
- (3) 水泥最小含量：90 kg 每立方米。
- (4) 骨料中细料 (直径小于 80 微米的石粉含量) 含量小于 15% (按重量计算)。
- (5) 骨料级配曲线采用国际大坝协会制定的标准。
- (6) BCR 型硬质填料，简称硬质填料 (Hardfill)，是一种没有坍落度的混凝土，胶凝材料

含量低，强度低。

### 1.3 研究的不同点

与国内碾压混凝土比较，依据的规范、标准不同，试验过程中具体模具、仪器不同，同时不参加粉煤灰。

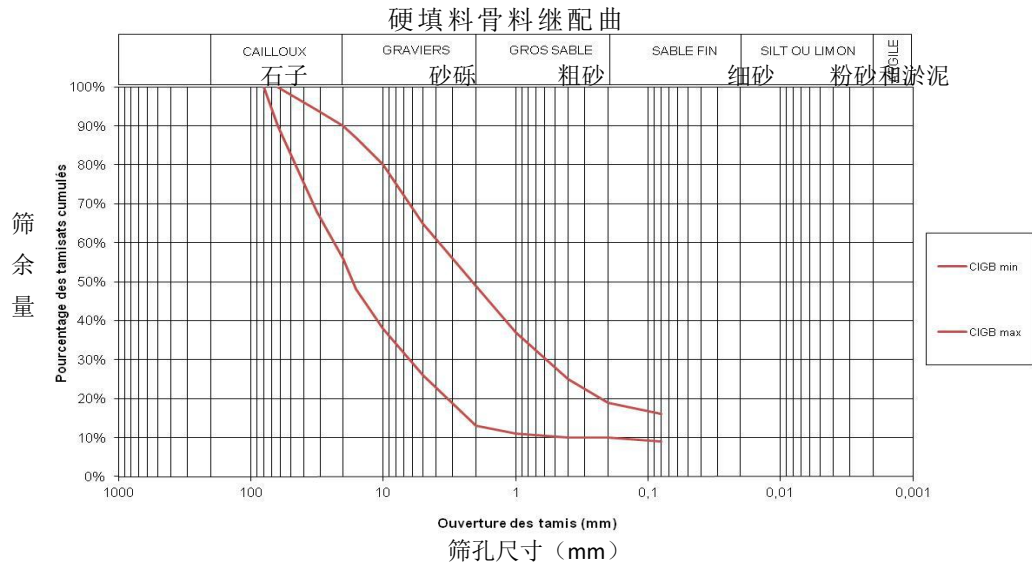


图 1: 合同文件和技术条款骨料级配曲线

## 2. 研究依据

除依据合同技术文件外，还参照了碾压混凝土规范、《胶结颗粒料筑坝技术导则》(SL 678-2014)和国际大坝协会 126 号公报。

## 3. 研究方法

### 3.1 混凝土法

混凝土法主要设计参数是**水胶比**，通过优化细骨料和粗骨料的级配，使拌和物空隙率最小，最终确定水泥、掺合料、水及外加剂用量，使混凝土具有适量的浆体体积，能够达到所需的配置强度和工作性。

### 3.2 土工法

以最大密度为主要控制指标，通过压实试件的用水量与密度之间的关系确定。

室内主要是葡氏密度试验（击实试验），针对不同水泥含量和不同水含量的填料进行的试验。该试验采用模具直径为 152mm 的 CBR 模具。

湿筛法剔除粒径大于 40mm 的骨料，进行葡氏密度试验获得最大密度及最优含水率。对掺入水泥夯实的样品，需进行各种力学试验和耐力试验。

进行葡氏密度试验的同时，相同成分的样品要进行 VeBe 标准试验。检测硬质填料的工作性。

综上所述，梅莱格大坝工程 BCR 型硬质填料配合比设计采用“混凝土法”和“土工法”相结合的方法。以土工法确定最大密度及最优含水率；以 VeBe 稠度确定混凝土可碾压性，指导现场施工。

## 4. 研究步骤

### 4.1 原材料

水泥：采用安菲达水泥厂生产的 CEM I 42.5N SR-3 水泥（原代码为 CEM I 42.5N HRS）。

水：当地自来水

掺合料：STTP 料场生产的人工砂 (0/5)。

外加剂：Sika 公司生产的 Sika ment 90MF 减水剂。

硬质填料骨料：河曲料场开采骨料，剔除大于 63mm 颗粒并筛除小于 5mm 部分。

原河床骨料剔除大于 63mm 超径料后的混合料中小于 0.08mm 颗粒含量不足（并且其中多为塑性颗粒），级配不符合设计要求，掺加 STTP 料场生产的人工砂（0/5）补充小于 0.08mm 无塑性颗粒含量。具体见表 4-1、4-2、4-2 和图 2。

表 4-1： STTP 料场生产的人工砂（0/5）级配试验结果表

筛网模数	40	39	38	35	32	29	26	23	20
筛孔 (mm)	8	6.3	5	2.5	1.25	0.63	0.315	0.16	0.08
人工砂(0/5)	100	100	99.9	84.6	58.7	39.2	28.0	20.4	18.0

表 4-2： 现场生产的砾石（5/63）级配试验结果表

筛网模数	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	35	32	29	26	23	20
筛孔 (mm)	63	50	40	31.5	25	20	16	12.5	10	8	6.3	5	2.5	1.25	0.63	0.315	0.16	0.08
粗骨料 (5/63)	100	98.2	94.0	87.9	79.9	67.0	55.6	41.9	30.6	22.4	14.4	8.6	3.0	2.1	1.7	1.5	1.3	1.2

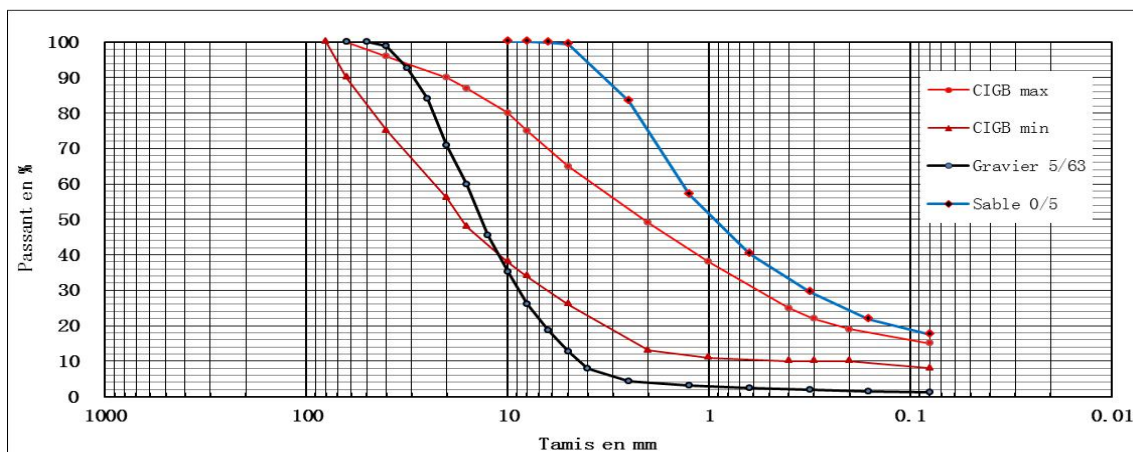


图 2： 0/5 和 5/63 级配曲线图

表 4-3： 0/5 和 5/63 骨料吸水率结果表：

参数	人工砂 0/5	粗骨料 5/63
吸水率	4.31%	1.71%

#### 4.2 主要试验仪器

击实仪、混凝土试验用搅拌机、维勃稠度仪、 $\Phi$  250mm\*500mm 试模、试验用振动台、压力试验机等。

#### 4.3 击实试验

水泥用量  $90\text{kg}/\text{m}^3$  不变，调整粗细骨料比例，进行葡氏密度试验，确定不同比例条件下的最大密度及最优含水率，试验结果见表 4-4。

表 4-4: 不同骨料比例下葡氏密度试验结果表

水泥掺量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	掺配比例 细骨料 (0/5) : 粗 骨料 5/63	<0.08mm 颗粒含量 (%)	最大湿密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	最大干密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	最优含水率 (%)
90	25%: 75%	5.5	2.47	2.34	5.6
	30%: 70%	6.2	2.47	2.33	5.7
	35%: 65%	7.0	2.45	2.33	5.4
	40%: 60%	7.8	2.44	2.30	5.9
	45%: 55%	8.6	2.44	2.30	6.0
	50%: 50%	9.4	2.40	2.25	6.7
	55%: 45%	10.3	2.41	2.25	7.0
	60%: 40%	11.1	2.40	2.25	6.9

#### 4.4 VeBe 稠度试验

以葡氏密度试验最大湿密度为硬质填料设计容重，采用最优含水率计算用水量，硬质填料拌合物含水率控制在最优含水率  $\pm 0.5\%$  以内，辅助以减水剂调整 VeBe 稠度，选择合适的 VeBe 稠度值成型试件进行耐久性试验。

#### 4.5 拌合物级配分析

为确定硬质填料拌合物中低于 0.08mm 颗粒的含量，对硬质填料拌合物水洗后进行级配分析。本次试验选取抗压强度、VeBe 均符合设计要求的四组配比，进行了拌合物级配分析试验，试验结果见表 4-5。

表 4-5: 硬质填料拌合物中小于 0.08mm 颗粒含量 (含水泥)

细骨料: 粗骨料	30%: 70%	35%: 65%	40%: 60%	45%: 55%
<0.08mm 颗粒含量	9.4%	10.0%	10.7%	11.5%

#### 4.6 耐久性试验

##### 4.6.1 骨料粒径与试模关系

表 4-6: 骨料最大粒径对应试模尺寸

骨料最大粒径	法国标准模数	截面积 ( $\text{cm}^2$ )	直径 (mm)	高度 (mm)
$\leq 16$	43	50	79.6	159.6
$\leq 31.5$	46	200	160	320
$\leq 63$	49	500	250	500

最大骨料粒径为 63mm，最终需成型  $\varnothing 250\text{mm}$  的大尺寸试件进行抗压强度试验。为了进行

对比试验，同时成型了 $\varnothing 160\text{mm}$ 试件（湿筛法剔除40mm以上颗粒）。两种试件的强度结果见表4-7所示。水泥掺量均为 $90\text{kg}/\text{m}^3$ 。

表 4-7:  $\varnothing 250\text{mm}$  和  $\varnothing 160\text{mm}$  试件抗压强度表

0/5: 5/63 掺配比 例	减水剂 掺量 (%)	试拌 含水率 (%)	实测拌 合物含水率 (%)	维勃 稠度 (s)	湿密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )			抗压强度 (MPa)			备注
					维勃 试模	$\varnothing$ 160mm 试模	$\varnothing 250\text{mm}$ 试模	7天	28天	90天	
25%: 75%	0.8	5.1	5.2	20.0	2440	2499	/	9.2	12.6	13.3	$\varnothing$ 160mm
30%: 70%	0.4	5.2	5.1	18.2	2431	2500	/	8.9	12.5	13.7	$\varnothing$ 250mm
						/	2544	8.3	11.1	13.5	$\varnothing$ 250mm
35%: 65%	1.0	5.1	5.0	21.1	2435	2495	/	9.0	12.6	14.6	$\varnothing$ 160mm
						/	2543	8.6	12.4	13.2	$\varnothing$ 250mm
40%: 60%	1.0	5.7	5.6	20.2	2412	2473	/	8.1	10.9	12.6	$\varnothing$ 160mm
						/	2536	6.9	10.0	11.7	$\varnothing$ 250mm
45%: 55%	1.0	6.0	6.0	18.0	2360	2451	/	7.3	9.4	12.3	$\varnothing$ 160mm
						/	2520	6.2	8.2	10.8	$\varnothing$ 250mm
50%: 50%	/	6.7	6.6	23.2	2354	2426	/	5.1	6.7	7.0	$\varnothing$ 160mm
55%: 45%	/	6.5	6.4	21.3	2346	2417	/	5.5	6.8	8.2	$\varnothing$ 160mm
60%: 40%	1.0	6.9	6.8	19.1	2317	2398	/	5.8	8.0	8.4	$\varnothing$ 160mm

根据上述强度结果，绘制的骨料中低于0.08mm颗粒含量与抗压强度关系见图3所示。

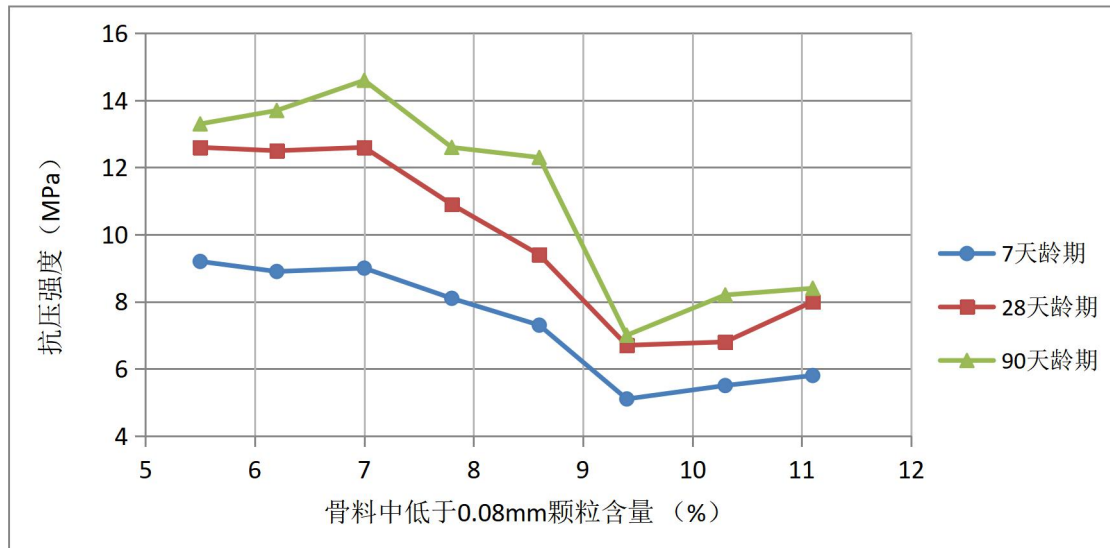


图 3: 骨料中低于 0.08mm 颗粒含量与抗压强度关系图

由表 4-7 及图 3 可得，细骨料掺量为 25%~60%时，抗压强度均满足设计要求，但是细骨料掺量大于 45%时，抗压强度降幅较大，且强度富裕系数较小，不建议用于施工。

### 5. 室内试验后推荐配合比

根据试验结果及经济性原则，选取人工砂掺量为 35%和 40%的配合比作为推荐配合比，进行现场工艺性试验，根据工艺性试验结果确定最终施工配合比。配合比见表 5-1 所示。

表 5-1: BCR 室内推荐配合比表

序号	掺配比例	水灰比	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	水 (kg/m <sup>3</sup> )	人工砂 0/5 (kg/m <sup>3</sup> )	卵石 r 5/63 (kg/m <sup>3</sup> )	减水剂	备注
1	0/5:5/63=35%:65%	0.68	90	61	816	1476	1% 0.9kg/m <sup>3</sup>	骨料为饱和面干状态
2	0/5:5/63=40%:60%	0.78	90	70	925	1350	1% 0.9kg/m <sup>3</sup>	

## 6. 现场碾压试验各项检测结果

### 6.1 BCR 现场碾压试验设计

试验区分 2 块进行，单块试验场地尺寸 21\*20m。现场铺层厚度 33-35cm，碾压后的厚度 30-33cm，试验层数为 4 层，碾压遍数 6-10 遍，每层静压 2 遍，然后振动碾压。层与层之间设置了热缝和冷缝，通过控制填筑间隔时间，形成的施工缝，测试的目的是检测层间结合。主要设备有硬质填料连续式拌和机、自卸汽车、推土机、振动碾、雾炮车、装载机、冲毛机等。现场取样配置了取芯钻机等。

### 6.2 BCR 现场骨料含水率检测

表 6-1: BCR 现场骨料含水率检测结果表

检测日期	骨料类型	含水率 (%)		备注
		0/5	5/63	
2020.1.2		4.24	2.60	
2020.1.3		4.33	2.72	
2020.1.6		2.95	2.78	

6.3 BCR 现场拌和物检测

表 6-2: BCR 拌合物现场检测结果表

检测日期	环境温度 (°C)	拌合物温度 (°C)	维勃稠度 (s)	备注
2020.1.2	9.2/9.5/13.1	11.0/11.3/15.6	24	
2020.1.3	10.5/10.7/12.0	11.9/11.3/15.0	30/22/25	
2020.1.6	12.1/15.8/16.1	13.2/16.6/17.8	23/25	

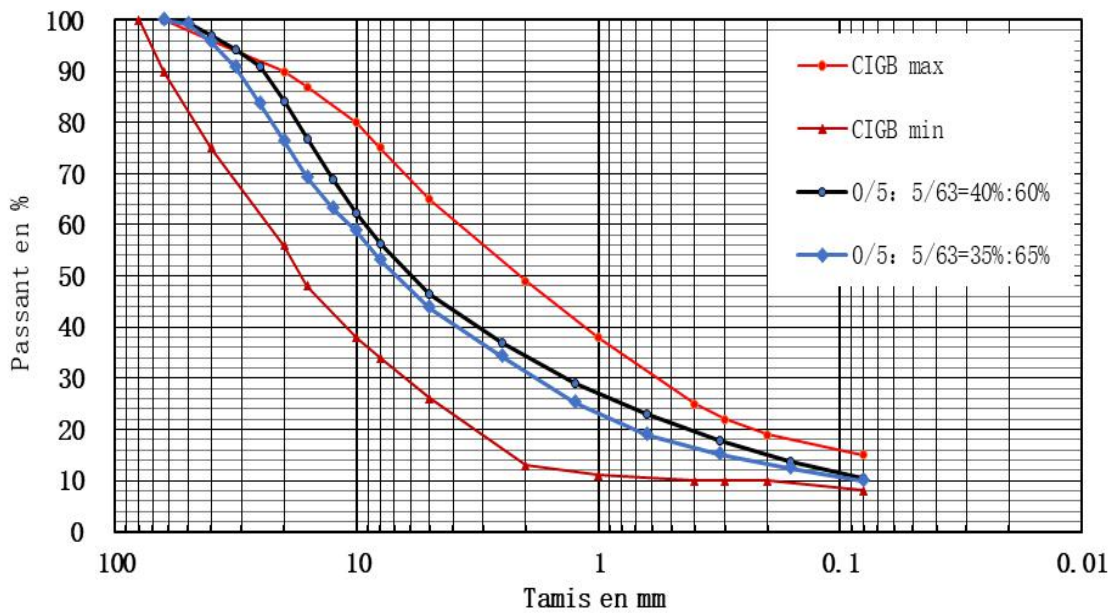


图 4: BCR 现场拌和物级配曲线图

6.4 BCR 现场密度检测

表 6-3: BCR 现场密度检测(核子密度仪)结果表

0/5:5/63=40%:60%				0/5:5/63=35%:65%		
碾压遍数	检测点数	湿密度平均值 (g/cm <sup>3</sup> )	干密度平均值 (g/cm <sup>3</sup> )	检测点数	湿密度平均值 (g/cm <sup>3</sup> )	干密度平均值 (g/cm <sup>3</sup> )

4	30	2.424	2.270	29	2.437	2.292
6	28	2.434	2.274	31	2.445	2.297
8	27	2.438	2.278	30	2.450	2.297
10	10	2.449	2.293	18	2.453	2.305

### 6.5 BCR 现场试验分层取样成型试块统计

表 6-2: BCR 现场分层填筑取样成型试验统计表

序号	掺配比例	日期	取样情况	备注
1	0/5:5/63=35%:65%	2020.01.02 第一层	7 天、28 天、90 天各 1 组	φ160mm*320mm
		2020.01.03 第二层	7 天、28 天、90 天各 1 组	φ160mm*320mm
		2020.01.06 第四层	φ160mm: 7 天、28 天 φ250mm: 28 天、90 天	φ160mm*320mm 2 组 φ250mm*500mm 2 组
2	0/5:5/63=40%:60%	2020.01.03 第三层	7 天、28 天、90 天各 1 组	φ160mm*320mm
		2020.01.06 第四层	φ160mm: 7 天、28 天 φ250mm: 28 天、90 天	φ160mm*320mm 2 组 φ250mm*500mm 2 组

### 6.6 BCR 现场试验结果汇总表

表 6-3: BCR 现场试验结果汇总表

序号	掺配比例	层数	维勃稠度 (S)	湿密度* (g/cm <sup>3</sup> )	含水率 (%)	龄期 (天)	试件密度 (g/cm <sup>3</sup> )	抗压强度 (MPa)	备注
1	0/5:5/63=35%: 65%	1	24	2.38	6.29	7	2.43	7.1	d=160mm
						28	2.41	11.3	
						90	2.44	12.9	
2		2/3	30/22	2.38/2.38	5.69 /6.51	7	2.46	6.7	d=160mm
						28	2.47	9.7	
						90	2.47	11.3	
3		4	23	2.35	6.13	7	2.47	7.1	d=160mm
						28	2.44	11.3	
						28	2.51	9.7	d=250mm
	90					2.51	11.4		
4	3	25	2.35	6.76	7	2.43	5.1	d=160mm	
					28	2.45	8.8		

						90	2.44	9.7	
5		4	25	2.35	6.56	7	2.43	5.1	d=160mm
						28	2.43	8.8	
						28	2.50	8.5	d=250mm
						90	2.50	10.5	

\* 此湿密度为维勃稠度试验测得。

## 7. 结语

在没有成熟、完整的试验规程情况下，采用“混凝土法”和“土工法”相结合的方法解决了该工程配合比设计，设计结果符合合同文件和技术条款要求，达到了设计目的。在设计研究过程中发现和提出以下建议：(1)料场原骨料级配幅度变化大，需要多次试配和掺入不足细料调整级配。在本次配合比设计中发现小于 0.08mm 颗粒含量高于 9%时，粗骨料不能有效形成骨架，抗压强度降幅较大，建议工程实际应用中，小于 0.08mm 颗粒含量调整为 6%~9%。(2) 强度富裕度较大，设计指标 90 天龄期的抗压强度是 7MPa，而室内和现场碾压试验取样的抗压强度达到 10MPa 以上。(3)本工程要求采用 CBR 试模击实确定最大密度及最佳含水率，对于骨料最大粒径为 40mm（湿筛剔除 40mm 以上颗粒）时，CBR 试模尺寸相对较小，个别试验结果需要修正。以上问题还需在后续的施工过程中继续研究和解决。

## 8. 参考文献

- [1] 贾金生、陈改新、马锋玲、李新宇译《碾压混凝土坝发展水平和工程实例》，中国水利水电出版社，2006；
- [2] CIGB ICOLD Bulletin 126 《Barrages en béton compacté au rouleau》，2003；
- [3] SL 678-2014 《胶结颗粒料筑坝技术导则》，中国水利水电出版社，2014；
- [4] 贾金生、Michel Linob、金峰、郑瑾莹《胶结颗粒料坝—环境友好的新坝型》，《Engineering》(工程)，2016 年，第 2 卷，第 4 期。

第一作者情况：

路名军，中国电建集团十五工程局有限公司，陕西省西安市科技路 16 号，710065

仇玉生，中国电建集团十五工程局有限公司，陕西省咸阳市渭城区金旭路 1 号水电十五局家属院，712000

雍浩，中国电建集团十五工程局有限公司，陕西省西安市科技路 16 号，710065