



群聊：堆石混凝土交流群8@8



堆石混凝土系列技术的最新进展

金峰，清华大学水利水电工程系

2023.10.13



1

堆石混凝土坝的发展历程

2

堆石混凝土研究最新进展

3

堆石混凝土坝的工程应用

4

堆石混凝土坝的未来展望



堆石混凝土是清华大学原创的新型筑坝技术
工艺简单，施工快速、质量可靠，节约成本，环境友好

1

堆石混凝土筑坝技术发展历程

首座堆石
混凝土坝

2005

清峪重力坝

重力坝正规建设

2009

蒙山拱坝开建

首座拱坝建设

2012

佰佳拱坝开建

双曲拱坝

2013

松林重力坝

90m高坝

2015

创新堆石混
凝土整体拱坝

一体化浇筑

2018

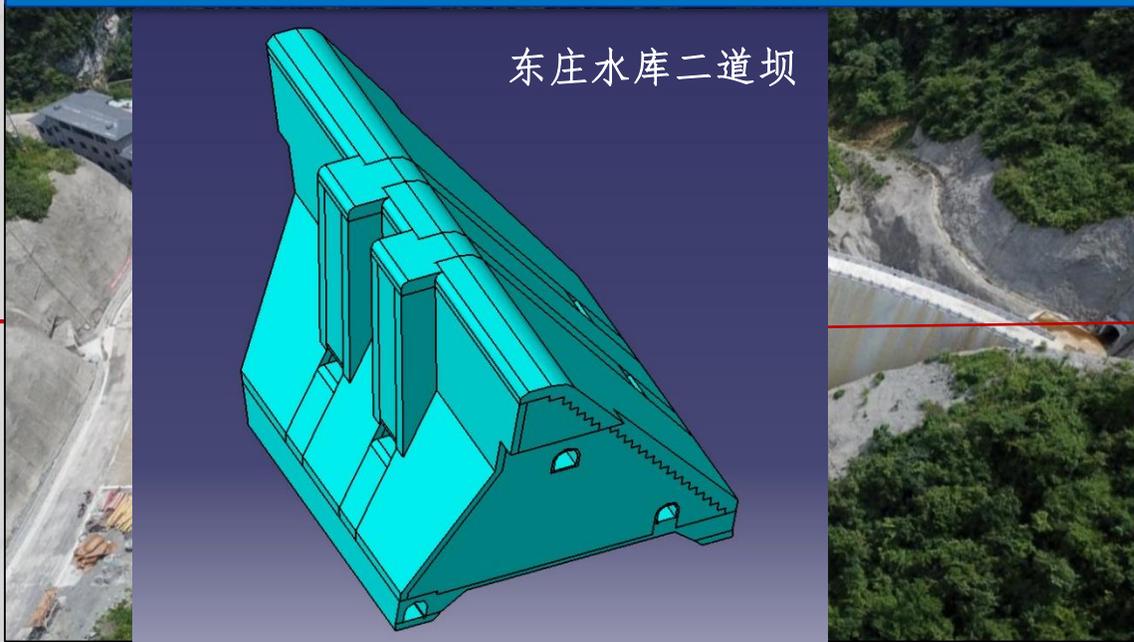
重点水利水
电工程应用

2021

2022年

东庄水库堆石混凝土拱坝,巴滩水电站省遵义市,平坝高抽5米,蓄18亿库容,大型水利枢纽工程采用堆石混凝土坝

东庄水库二道坝



1

堆石混凝土坝的发展历程

2

堆石混凝土研究最新进展

3

堆石混凝土坝的工程应用

4

堆石混凝土坝的未来展望

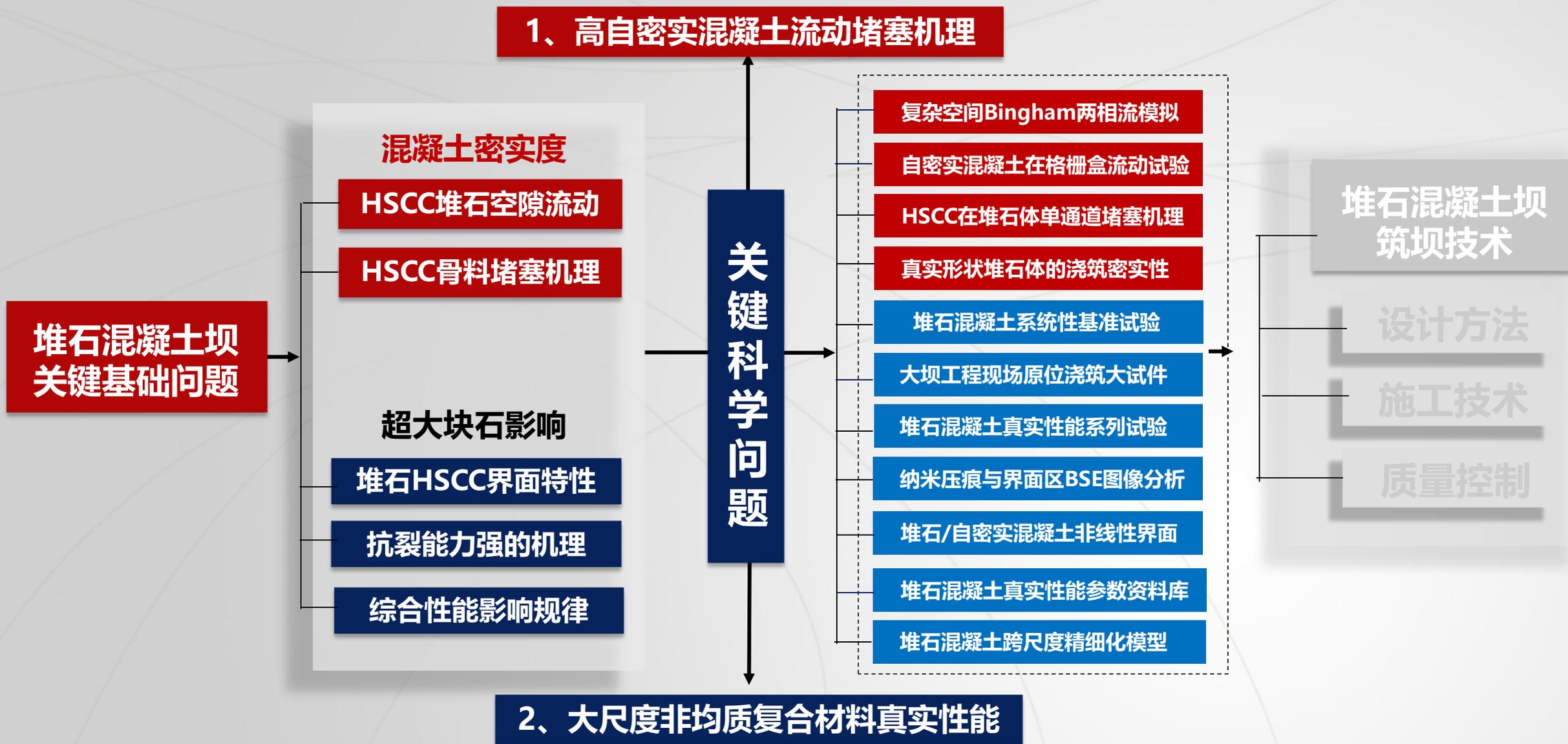
堆石混凝土密实性研究

堆石混凝土综合性能研究

堆石混凝土坝抗震研究

堆石混凝土坝信息化研究

堆石混凝土研究国际交流



堆石混凝土密实性判定公式

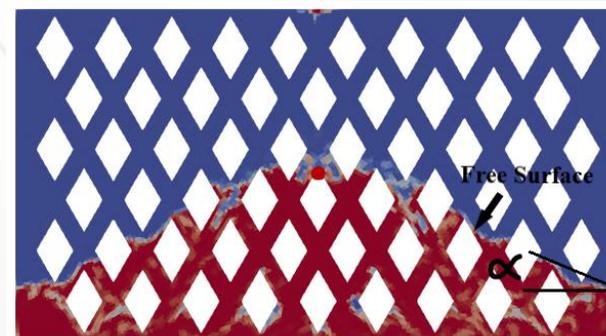
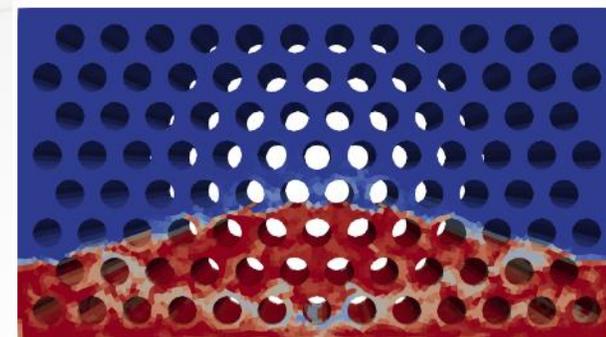
$$I_A = \frac{MK(1-\varphi)}{s} \frac{\tau_0}{\rho g} = \zeta \frac{\tau_0}{\rho g}$$

堆石特性 自密实混凝土特性

$$\zeta = \frac{MK(1-\varphi)}{s}$$

- M : 堆石形状系数
 K : 堆石堆积系数
 φ : 堆石空隙率
 s : 堆石特征粒径

Shape	Circular	Diamond	Hexagon	Rotated Hexagon	Pentagon
M	$\frac{4}{\pi}$ =1.2732	$2\sqrt{3}$ =3.4641	$\frac{2}{\sqrt{3}}$ =1.1547	$\frac{8}{3\sqrt{3}}$ =1.5396	$\frac{(5+2\sqrt{5})}{\sqrt{5(5+2\sqrt{5})}}$ =1.3764



$$K = \frac{l_b \rho g A_s}{\tau_0 (1-\varphi) A_p}$$

堆石混凝土堆石粒径要求

工程等级	堆石装运及堆铺工艺	料源处堆石最小粒径标准 ¹
1、2级大坝或3级及以下高坝	——	堆骨粒径比 ≥ 15
3级及以下中、低坝	无缓冲避碎措施	
	有缓冲避碎措施	堆骨粒径比 ≥ 12

宜采用毛石，可采用块石或漂石；采用板状岩块时，其块厚不小于150mm，用量比例不宜大于全部堆石的15%，超过时应进行论证。

入仓铺堆的堆石不宜为单一粒径级配，粒径不小于300mm的堆石比例不宜小于70%，不小于400mm的堆石比例不宜小于30%。

堆石的最大粒径不应超过结构断面最小边长的1/4，不宜大于浇筑层厚，且不宜小于400mm。

入仓堆铺到位的堆石粒径不宜小于150mm，且堆骨粒径比不应小于10；粒径小于150mm时，应进行长距离浇筑充填试验，经论证后可使用。

揭示水化全过程大块石-自密实混凝土耦合作用机理，建立自密实混凝土与堆石混凝土性能关系，构建堆石混凝土**综合性能指标体系**

工程尺度

堆石混凝土跨尺度精细化计算分析模型

细观尺度

全尺寸现场试验

- 大坝现场原位浇筑与切割
- 堆石混凝土真实性能试验



系统性基本试验

- 自密实混凝土性能试验
- 堆石混凝土综合性能试验



界面细观试验

- 纳米压痕与界面区BSE图像
- 堆石与自密实混凝土交界面

堆石混凝土材料综合性能指标体系

抗拉压强度

抗剪断强度

极限拉伸值

界面细观指标参数

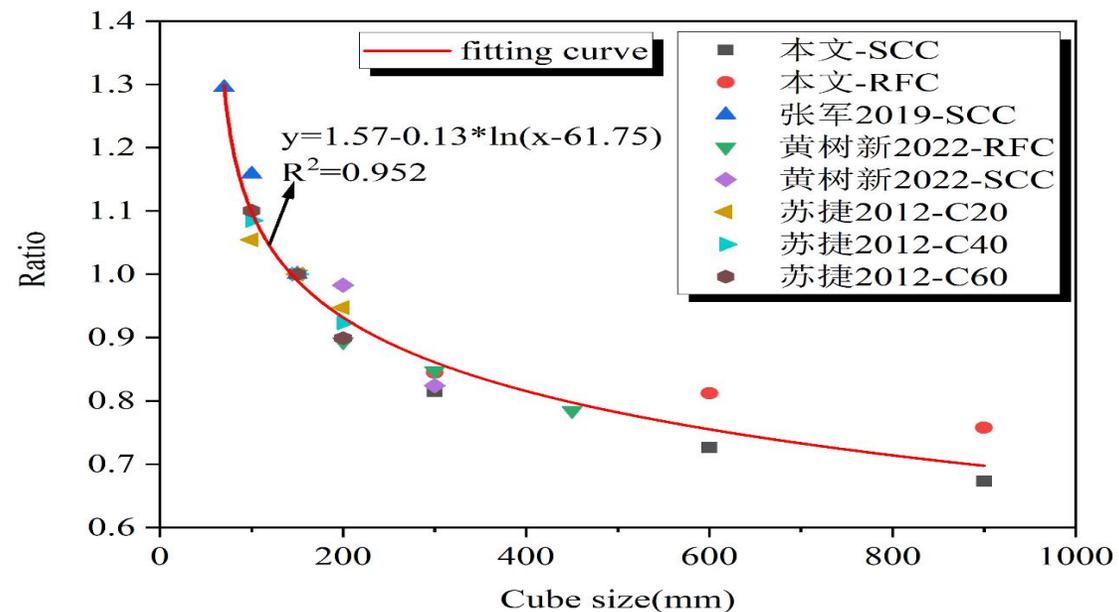
动强度全曲线参数

全尺寸真实参数库

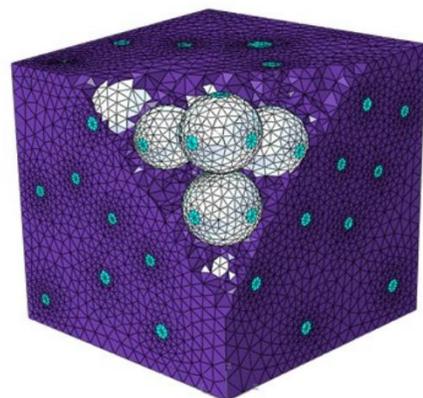
900mm超大试件试验

堆石混凝土抗压强度尺寸效应影响

- 不同尺寸破坏形态一致，RFC和HSCC破坏形态也一致，都是“X”形压剪破坏形态
- RFC强度高于HSCC强度



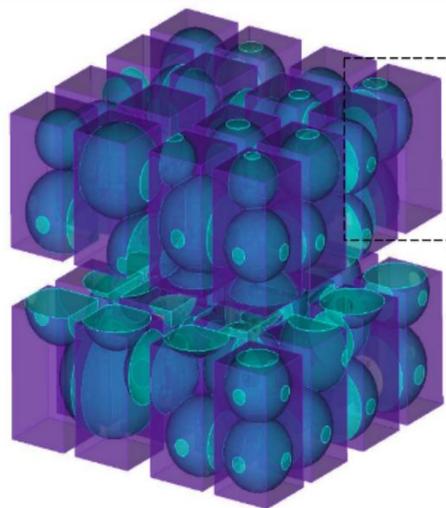
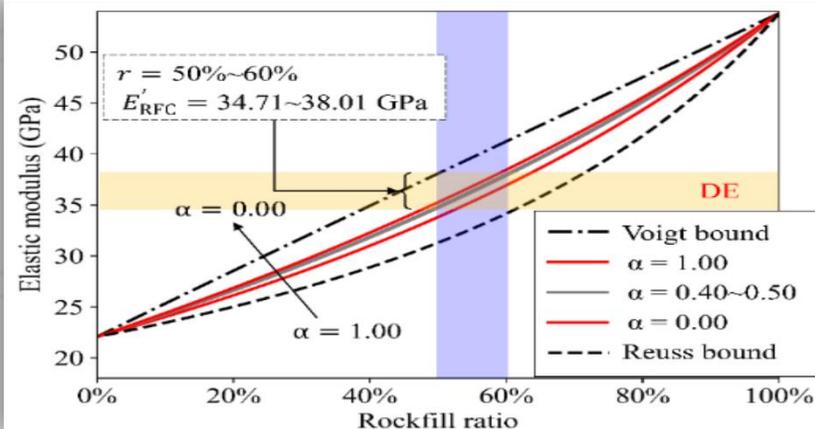
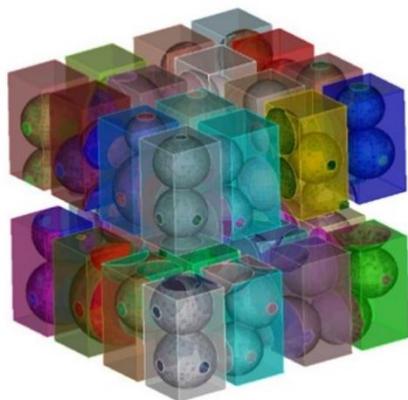
Eshelby张量夹杂推导堆石混凝土等效弹模



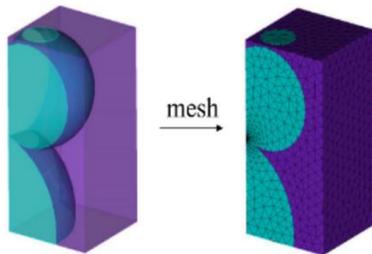
Numerical modeling of rock-filled concrete



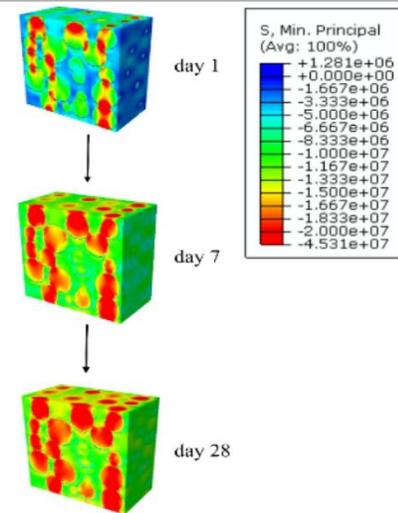
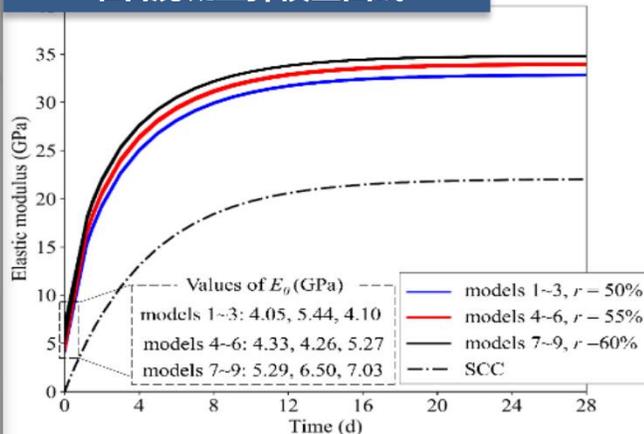
A multiphase model in line with a full-scale experiment at an RFC dam site



Mesh generation example of one specimen



堆石混凝土弹模全曲线



空隙影响

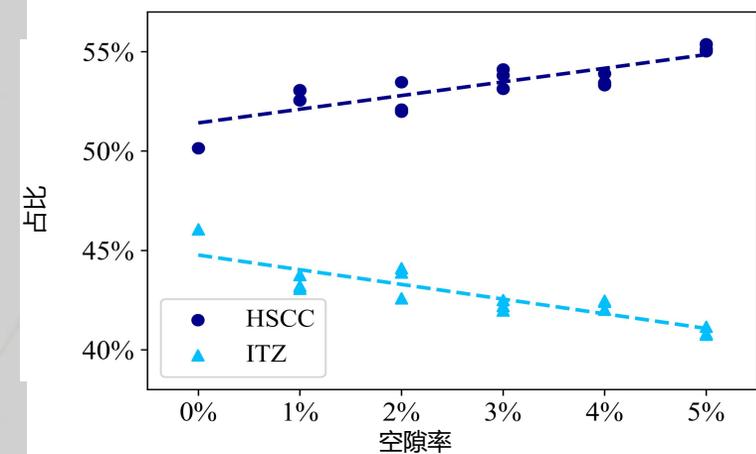
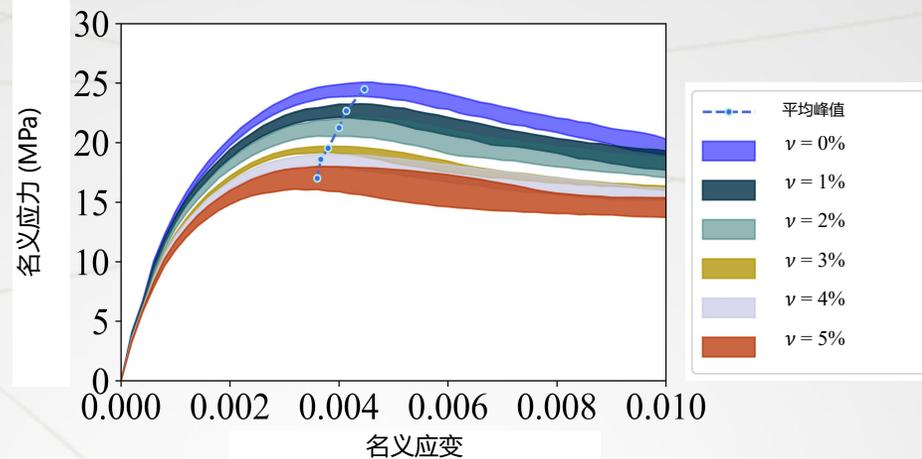
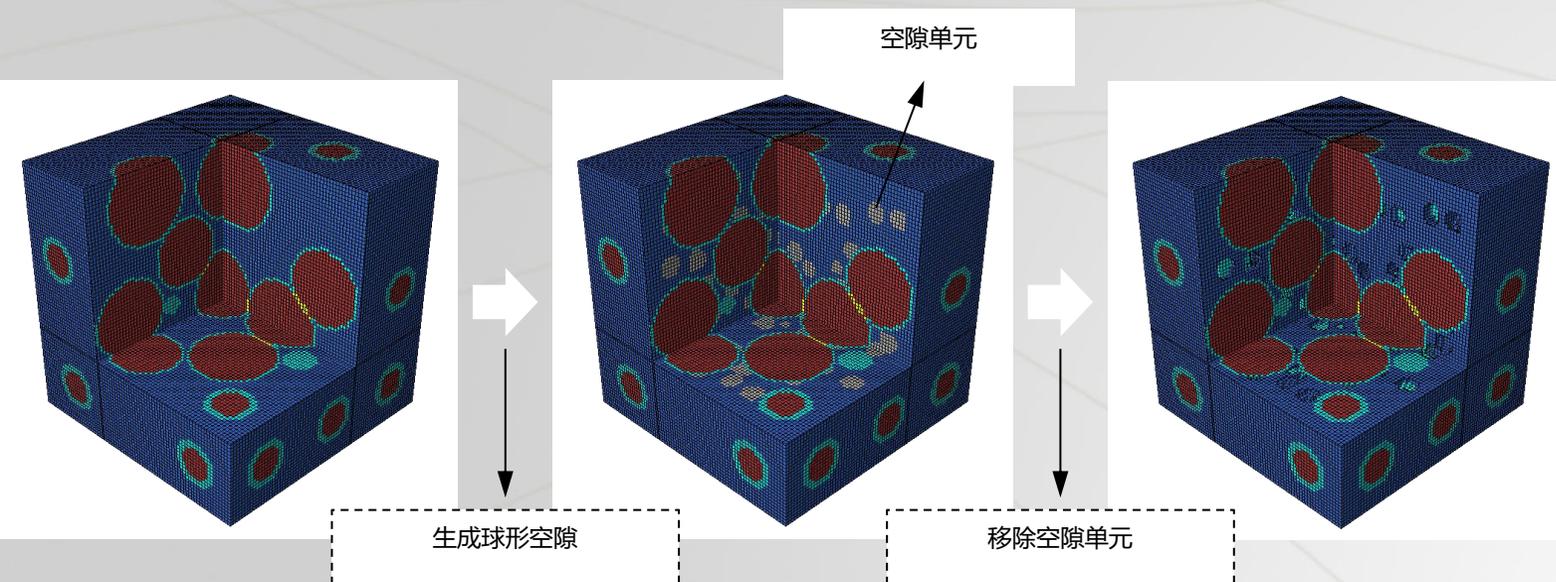


图 全部损伤单元中HSCC和ITZ占比

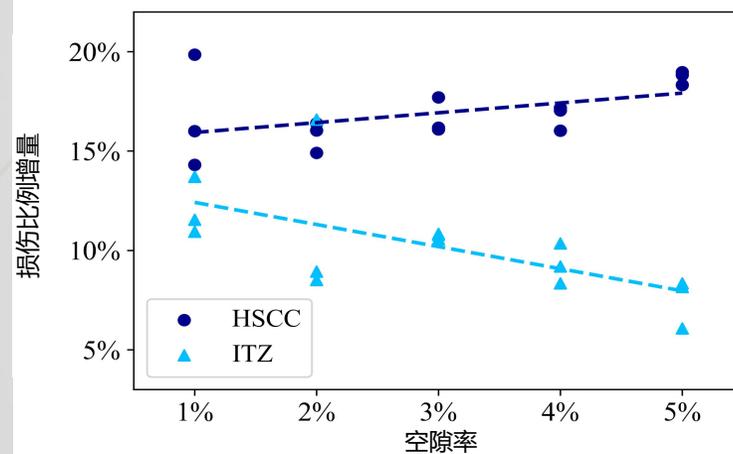
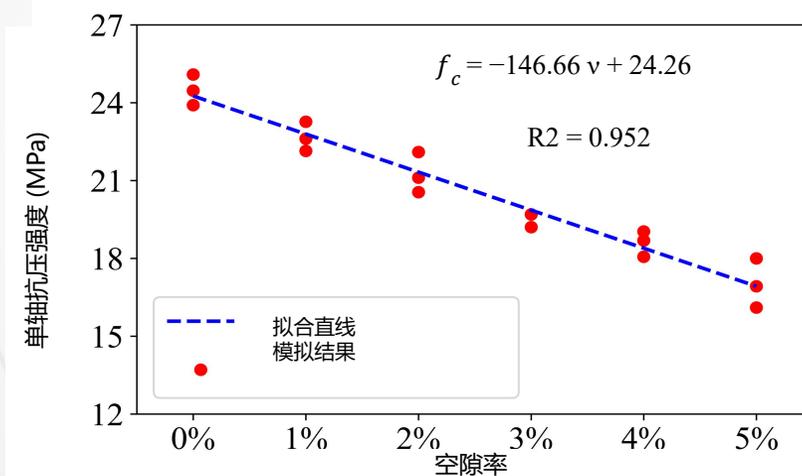
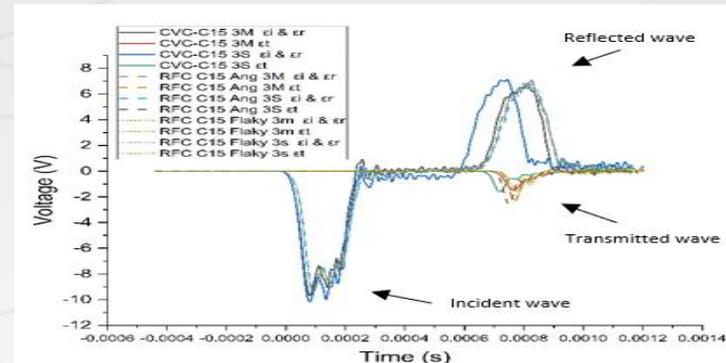


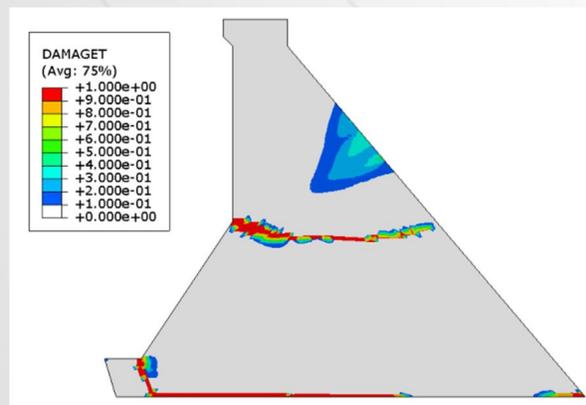
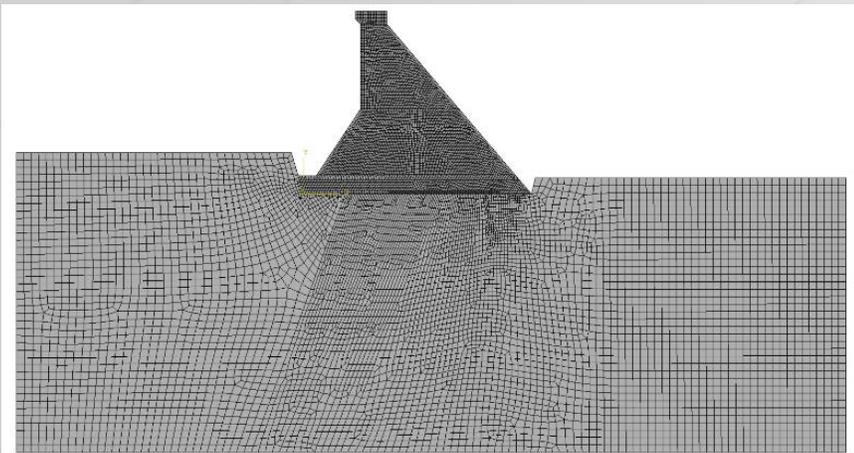
图 空隙周围HSCC和ITZ单元损伤比例增量



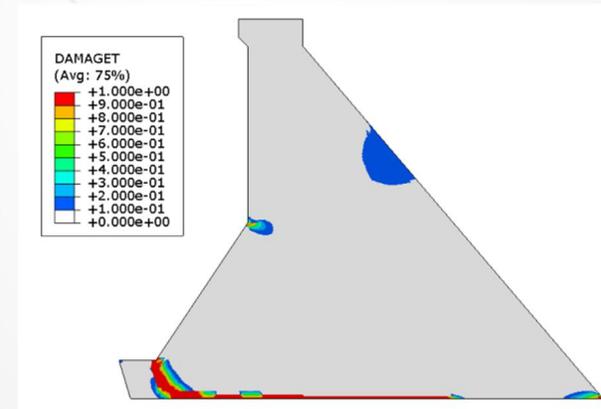
Hopkinson动力试验



Balakot抗震分析



(a) Conventional vibrating concrete dam



(b) Rock-filled concrete dam

堆石混凝土堆石品质要求

堆石混凝土设计标号	C ₉₀ 10	C ₉₀ 15	C ₉₀ 20	C ₉₀ 25	C ₉₀ 30	C ₉₀ 35
堆石的饱和抗压强度 (MPa)	≥30			≥40		≥50

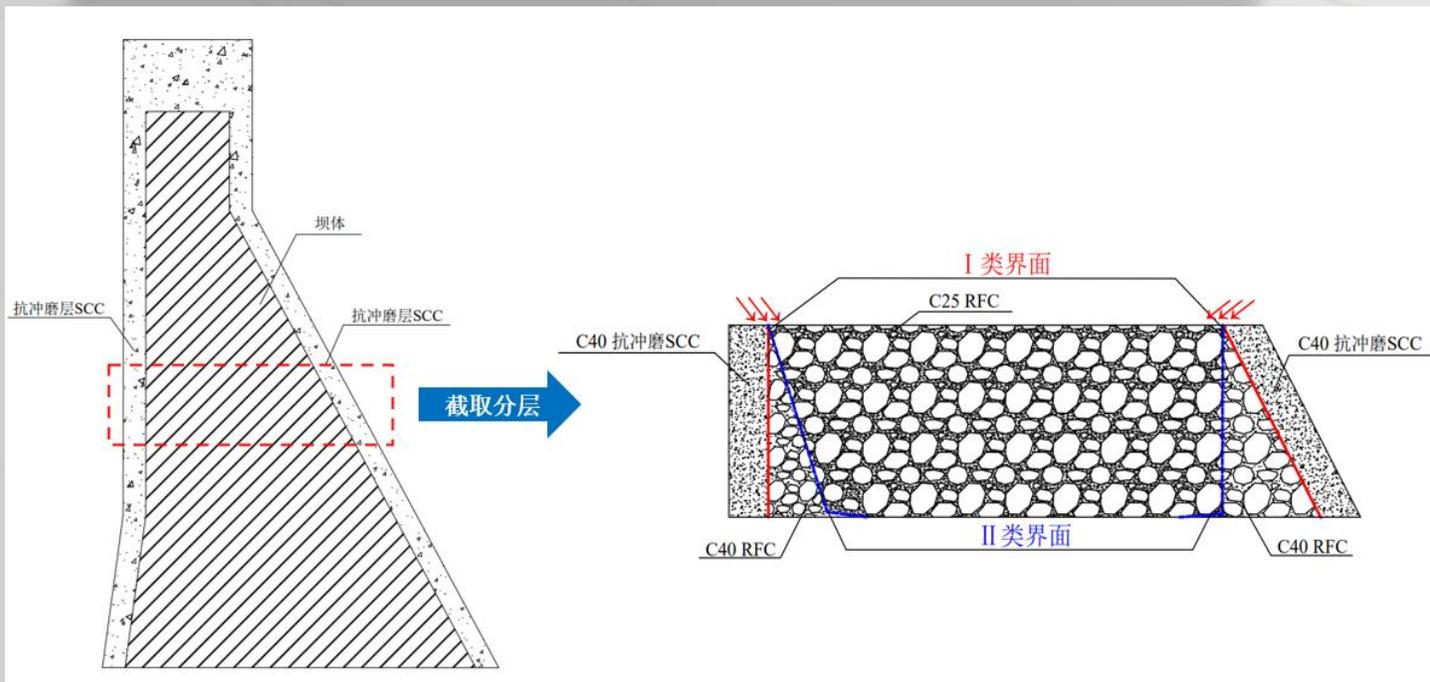
注：有抗冻要求的表层混凝土，上游防渗区的堆石混凝土应提高要求。

堆石的饱和单轴抗压强度不宜低于表6.2.1-1的要求，不满足表6.2.1-1的要求的堆石料经专题论证后，可应用于不高于50m的重力坝和不高于30m的拱坝。堆石表面含泥量不应大于0.2%，对于高坝和1、2级大坝应按不大于0.1%控制，堆石表面含泥量试验应按本标准附录B.2的有关规定执行。

对重要工程：

项目	指标
吸水率 (%)	< 1.5
压碎指标值 (%)	≤ 16

抗冲耐磨SCC及其与RFC一体化



C40自密实混凝土抗冲磨强度**9.43h/ (kg/m²)**

超过规范要求 and 东庄企业标准**7.9h/ (kg/m²)**

采用SCC做抗冲磨层**可行**

为采用**一体化浇筑**提供了数据支撑

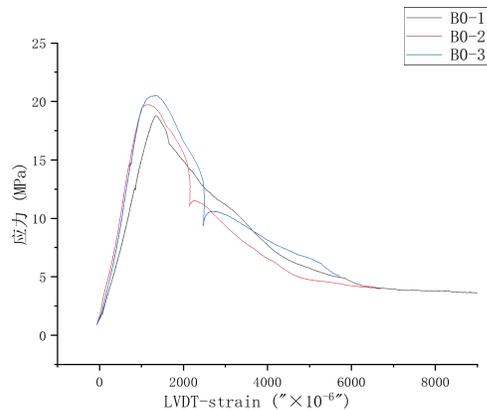
东庄堆石混凝土二道坝



叶巴滩堆石混凝土二道坝

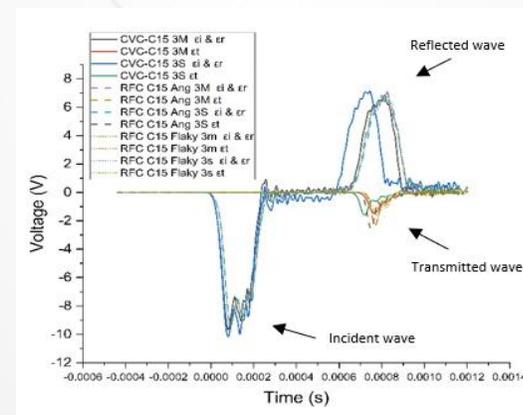


动强度试验



试件尺寸	编号	应变率		
		$10^{-5}/s$	$10^{-4}/s$	$10^{-3}/s$
100*100*200mm	平均抗压强度 (Mpa)	21.207	22.690	23.195
	f_d/f_c	-	1.070	1.094
150*150*300mm	平均抗压强度 (Mpa)	19.671	20.789	22.381
	f_d/f_c	-	1.057	1.138

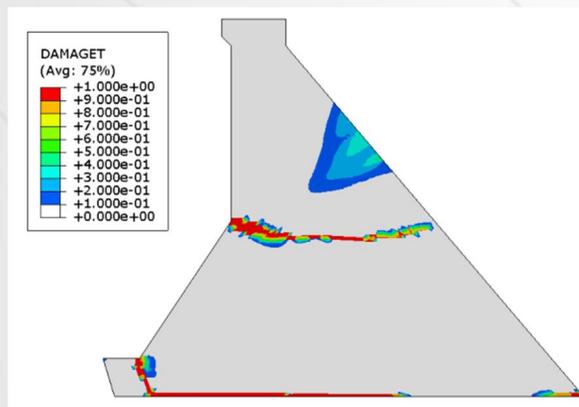
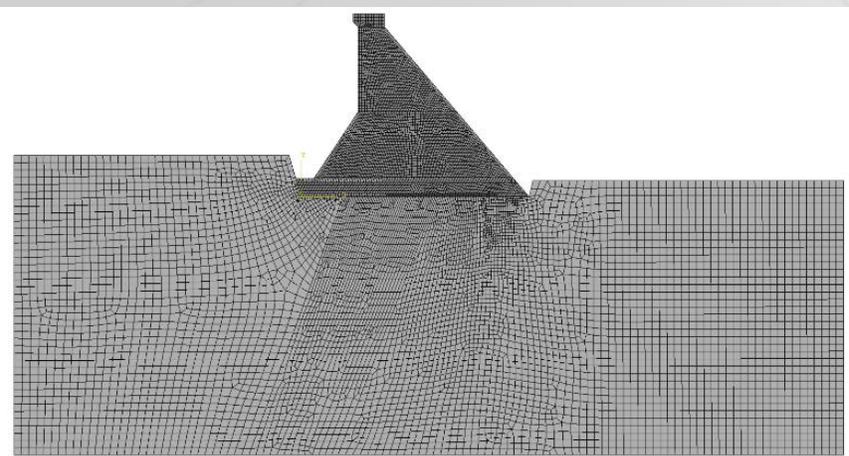
Hopkinson试验



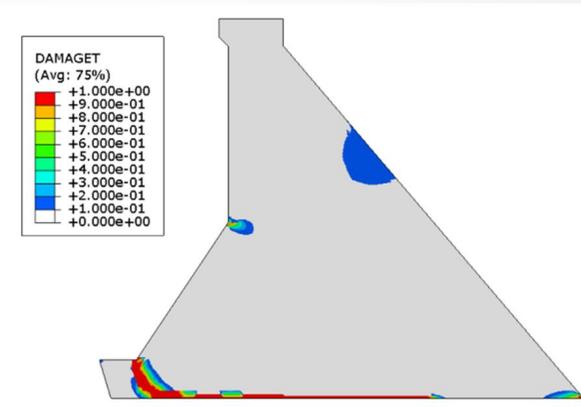
堆石混凝土坝抗震分析

巴基斯坦Balakot重力坝：坝高50m

	第一级 设防标准	第二级 设防标准	OBE 工况 下 PGA	MCE 工况下 PGA
美国规范	50 年超越概率 10%	100 年超越概率 1%	0.253g	0.701g



(a) Conventional vibrating concrete dam



(b) Rock-filled concrete dam



西沐建信CIM4R

报警内容 当前(自密实砼区域)温度已超45.0!

报警时间 2023-10-11 14:39:30

[查看详情](#)

昨天 22:27

流程进度提醒

流程名称: 永丰水库2层3坝段3#EL390.5-392.5浇筑完成

提交时间: 2023-10-11 22:25:48

[查看详情](#)

10:01

系统运行简报

系统名称: 永丰水库堆石混凝土管理系统

简报内容: 近24小时工程施工情况简报

发布时间: 2023-10-12 10:00:12

[查看详情](#)

堆石混凝土信息管理系统

国际大坝委员会堆石混凝土坝研讨会



领英堆石混凝土坝交流群



Rock-Filled Concrete Dams

Public group

[Earn an Active Group badge](#)

1,006 members

Including Sera Lazaridou and 457 other connections



[Invite connections](#)

[Show all →](#)

Analytics

Last 15 days activity

7,911 ▼ 18%

Active members

154 ▼ 24%

New members

13 ▲ 30%

Posts

24,561 ▼ 12%

Post views

[Show all →](#)

建立了完整的**堆石混凝土筑坝技术标准体系**

行业标准为骨架，**地方标准**显特色，**团体标准**管细节，整体推进形成**国际标准**

行业
标准

国家能源局行业标准
《堆石混凝土筑坝技术导则》(NB10077-2018) (中英文)
《水电水利工程堆石混凝土施工技术规范》(DL5806-2020)

水利行业标准
《胶结颗粒料筑坝技术导则》
(SL678-2018) (中英文)

团体
标准

《堆石混凝土坝有限元数值仿真技术导则》
《堆石混凝土坝坝型比选设计导则》

《堆石混凝土现场工艺试验规程》
《堆石混凝土大试件试验规程》
《堆石混凝土单元工程施工质量验收评定标准》

地方
标准

贵州省地方标准
《堆石混凝土拱坝技术规范》DB52 1545-2020

国际
标准

国际大坝委员会技术公报 ICOLD Bulletin190
《Design and Practice - Rock-Filled Concrete Dam》

1

堆石混凝土坝的发展历程

2

堆石混凝土研究最新进展

3

堆石混凝土坝的工程应用

4

堆石混凝土坝的未来展望

松林水库位于云南省彝良县，堆石混凝土重力坝，最大坝高90m，已基本完工



大坝施工现场仓面

福建省坪坑水库**堆石混凝土重力坝**，坝高79.7m，是目前福建已建的最高堆石混凝土坝。



福建省溪源水库堆石混凝土重力坝，坝高77m



麻柳湾水库位于四川省雷波县，**堆石混凝土重力坝**，坝高75米

采用**一体化浇筑工艺**，廊道与坝体同步上升，设计坝基坝肩爬坡廊道，便于运行管理，**避免了廊道浇筑对坝体浇筑的影响。**



满坪水库是青藏高原上第一座**堆石混凝土坝**，坝高77m，库区海拔2500-2600米，坝轴线长139.5米。



晓龙沟堆石混凝土坝，坝高44m，坝顶海拔3956m。



马跳堆石混凝土重力坝，最大坝高69m，已接近封顶

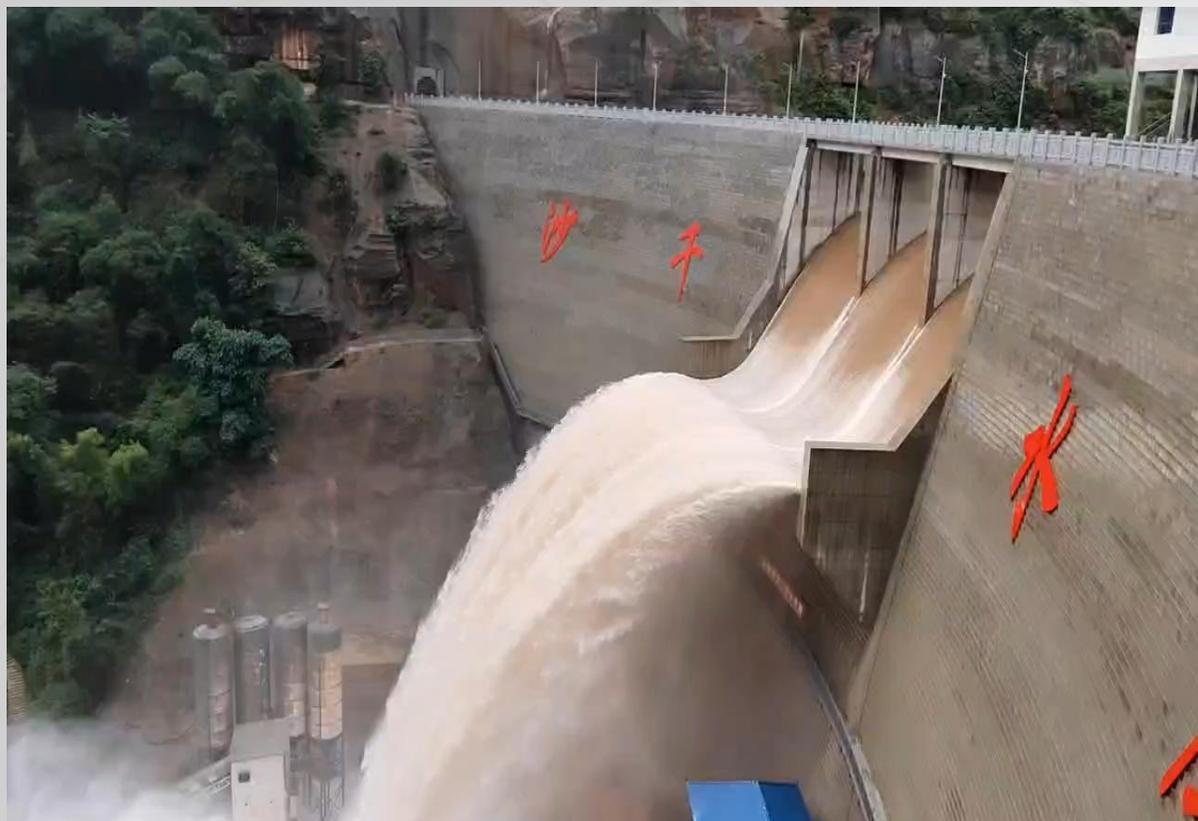


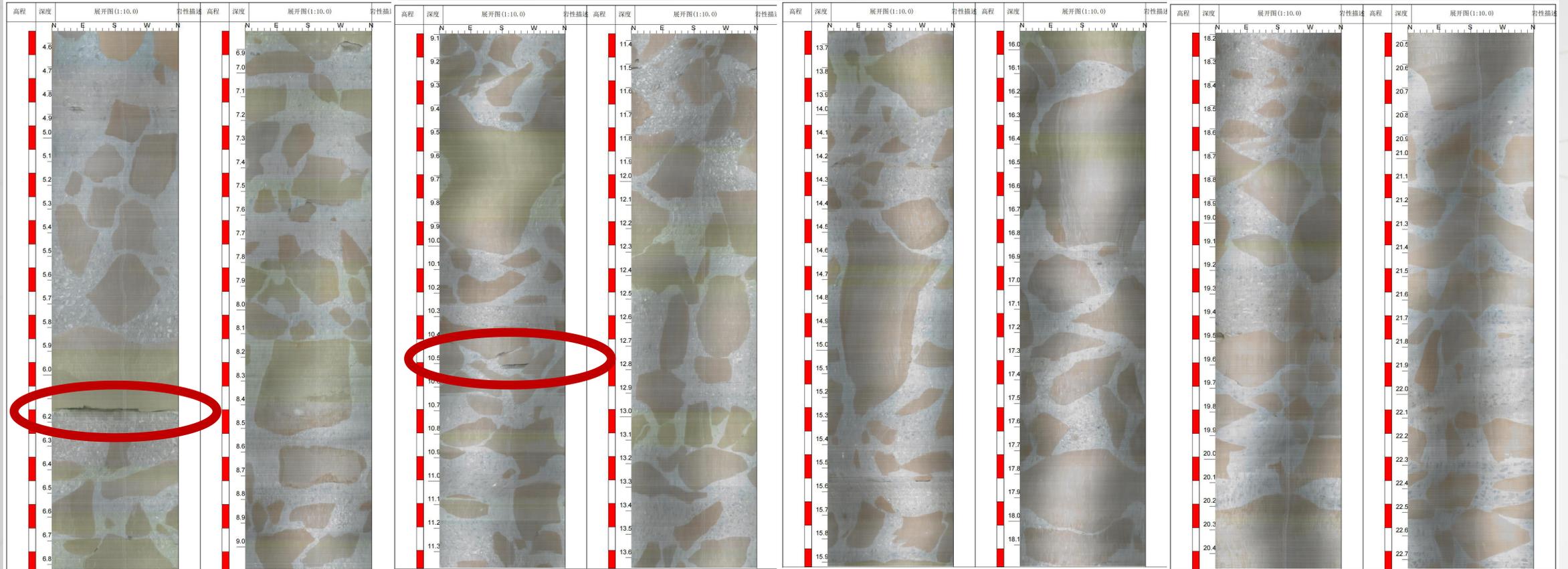
3

堆石混凝土坝工程应用

沙干水库位于贵州省遵义市，**堆石混凝土拱坝**，最大坝高66m

采用**不分纵横缝、全断面整体上升浇筑**，堆石采用砂岩





检测项目 序号	检测孔号	段次	压水段位 (m)			试验 压力 (MPa)	稳定 流量 (L/min)	透水率 (Lu)		是否满足 设计要求
			自	至	段长			设计值	实测值	
1	ZK4	1	452.0	447.0	5.0	0.10	0.14	≤5.0	0.28	满足
2		2	447.0	442.0	5.0	0.20	0.32	≤5.0	0.32	满足
3		3	442.0	437.0	5.0	0.25	0.42	≤5.0	0.34	满足
4		4	437.0	432.0	5.0	0.30	0.52	≤5.0	0.35	满足
5		5	432.0	426.5	5.5	0.35	0.52	≤5.0	0.30	满足
5	ZK5	1	452.0	447.0	5.0	0.10	0.22	≤5.0	0.44	满足
6		2	447.0	442.0	5.0	0.20	0.18	≤5.0	0.18	满足
7		3	442.0	437.0	5.0	0.25	0.56	≤5.0	0.45	满足
8		4	437.0	432.0	5.0	0.30	0.52	≤5.0	0.35	满足
9		5	432.0	427.0	5.0	0.35	0.68	≤5.0	0.39	满足
10		6	427.0	422.0	5.0	0.40	0.64	≤5.0	0.32	满足
11		7	422.0	417.0	5.0	0.45	0.74	≤5.0	0.33	满足
12		8	417.0	412.0	5.0	0.50	0.70	≤5.0	0.28	满足
13		9	412.0	407.0	5.0	0.55	0.78	≤5.0	0.28	满足
14		10	407.0	402.0	5.0	0.60	1.10	≤5.0	0.37	满足

Max: 0.45 Lu

Min: 0.28 Lu



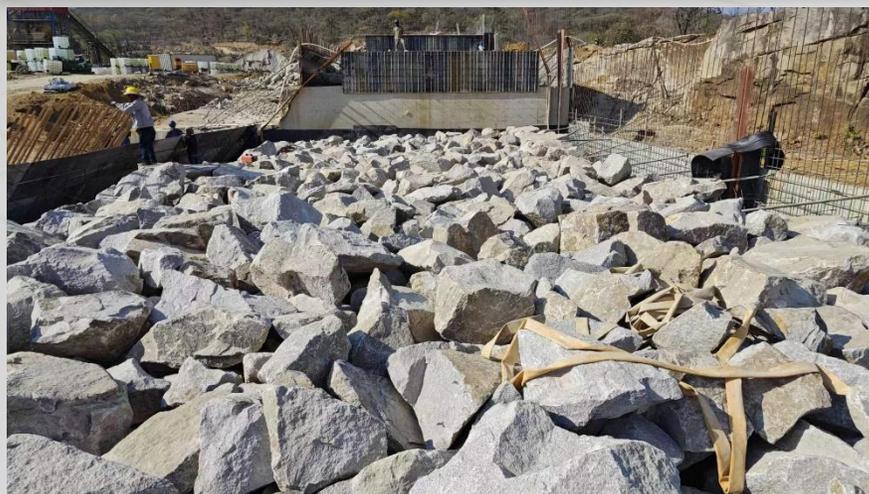
3

堆石混凝土坝工程应用

牛洞口堆石混凝土拱坝，最大坝高64m



安哥拉Niobonga堆石混凝土坝正在浇筑，坝高32米，坝顶长507米



1

堆石混凝土坝的发展历程

2

堆石混凝土研究最新进展

3

堆石混凝土坝的工程应用

4

堆石混凝土坝的未来展望

堆石混凝土材料优化

堆石混凝土工艺优化

堆石混凝土高坝建设

堆石混凝土坝信息化

堆石混凝土坝国际化

20余年持续研究与开发，让堆石混凝土坝从无到有，从小到大，160余大坝矗立在祖国的万里山河，这是清华水利系研究团队集体智慧的结晶，是业主、设计、施工、监理等工程建设各方技术人员与工人辛勤工作的成果。

向多年来支持堆石混凝土坝技术发展的领导、专家、技术人员和朋友们表达真诚的感谢！



群聊：堆石混凝土交流群8@8



感谢大家关注!

Prof. JIN Feng

Tsinghua University

Email: jinfeng@tsinghua.edu.cn

<https://www.linkedin.com/groups/12881012/>

清华大学

Tsinghua University