





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







# 报告提纲

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

# 1 堆石混凝土坝工艺



**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

2003年

**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

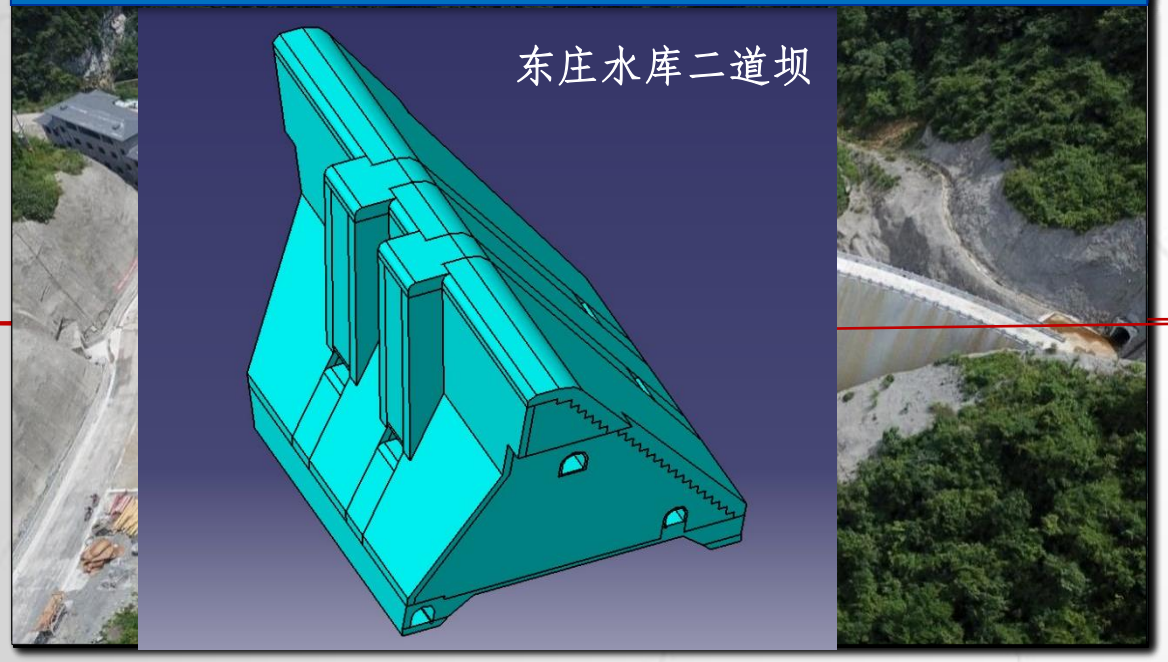
**松林重力坝** — 90m高坝 — 2015

**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

东庄水库二道坝，位于贵州省遵义市，平坝高535米，2018年开工建设，2018年完工。



# 报告提纲

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

# 2 堆石混凝土研究最新进展

堆石混凝土密实性研究

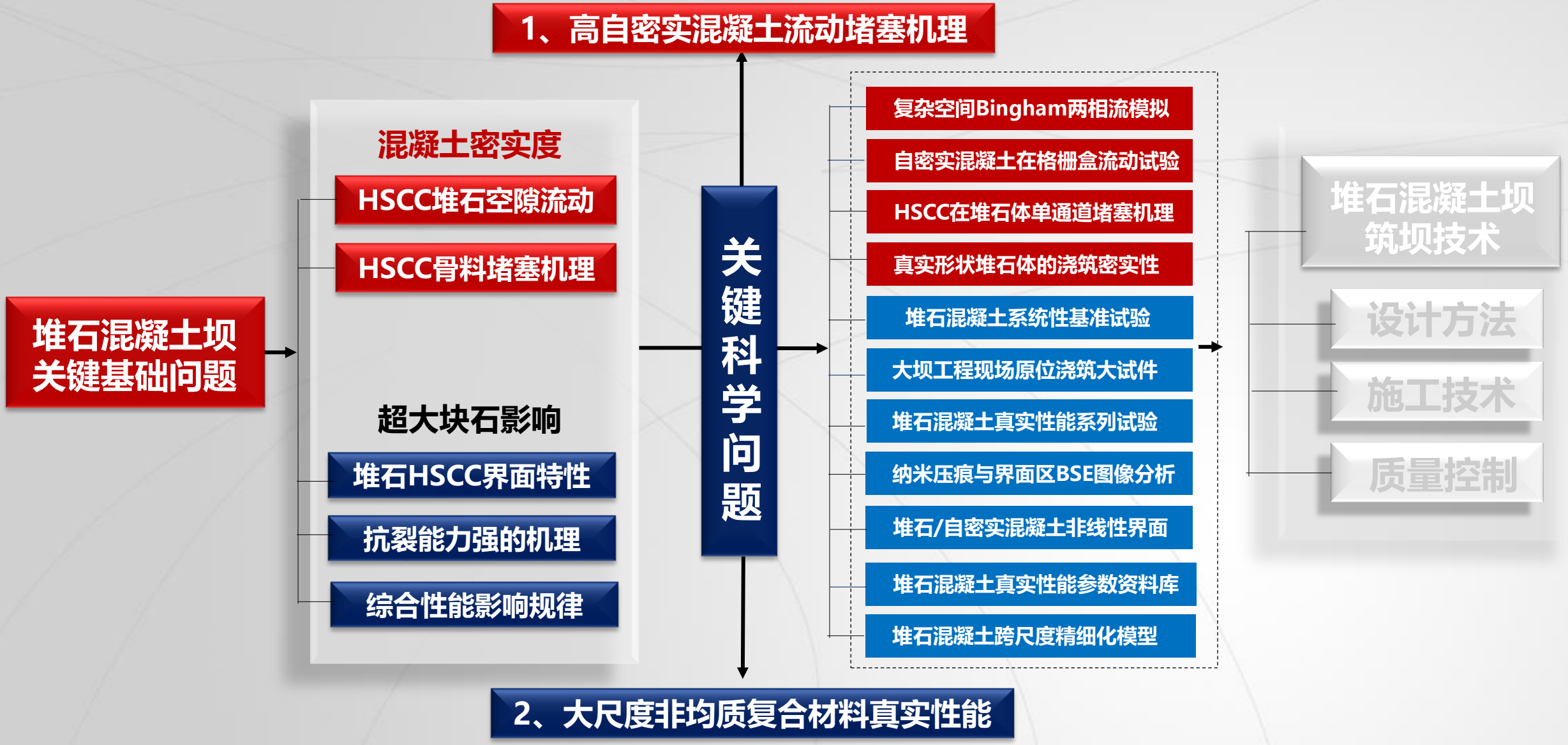
堆石混凝土综合性能研究

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

# 2 堆石混凝土研究最新进展



## 堆石混凝土密实性判定公式

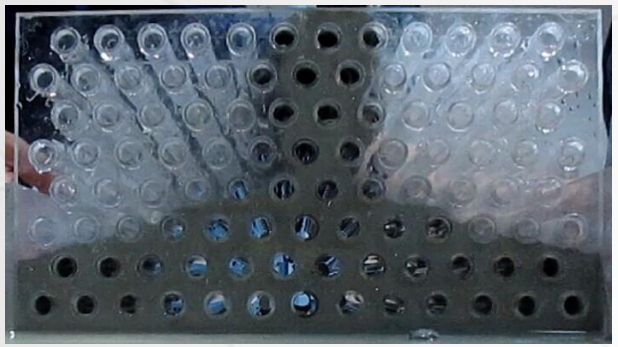
$$I_A = \frac{MK(1-\varphi)}{s}\frac{\tau_0}{\rho g} = \zeta\frac{\tau_0}{\rho g}$$

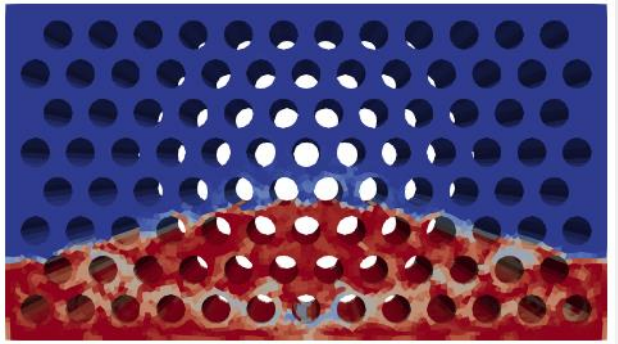
堆石特性 自密实混凝土特性

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

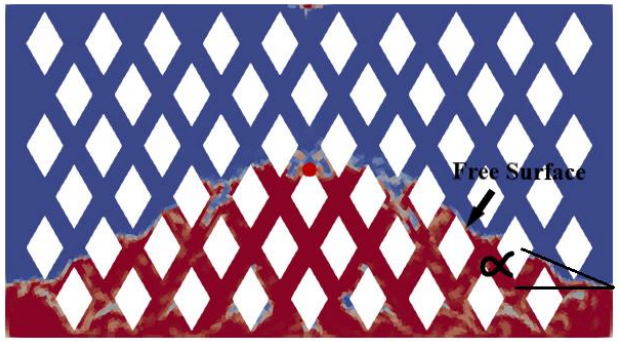
$M$：堆石形状系数
$K$：堆石堆积系数
$\varphi$：堆石空隙率
$s$：堆石特征粒径

| 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 |





$$K=\frac{I_b \rho g A_S}{\tau_0(1-\varphi)A_P}$$



## 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。

# 堆石混凝土关键基础问题



**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**

**堆石混凝土跨尺度精细化计算分析模型**

**工程尺度**

**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

+

**细观尺度**

**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**

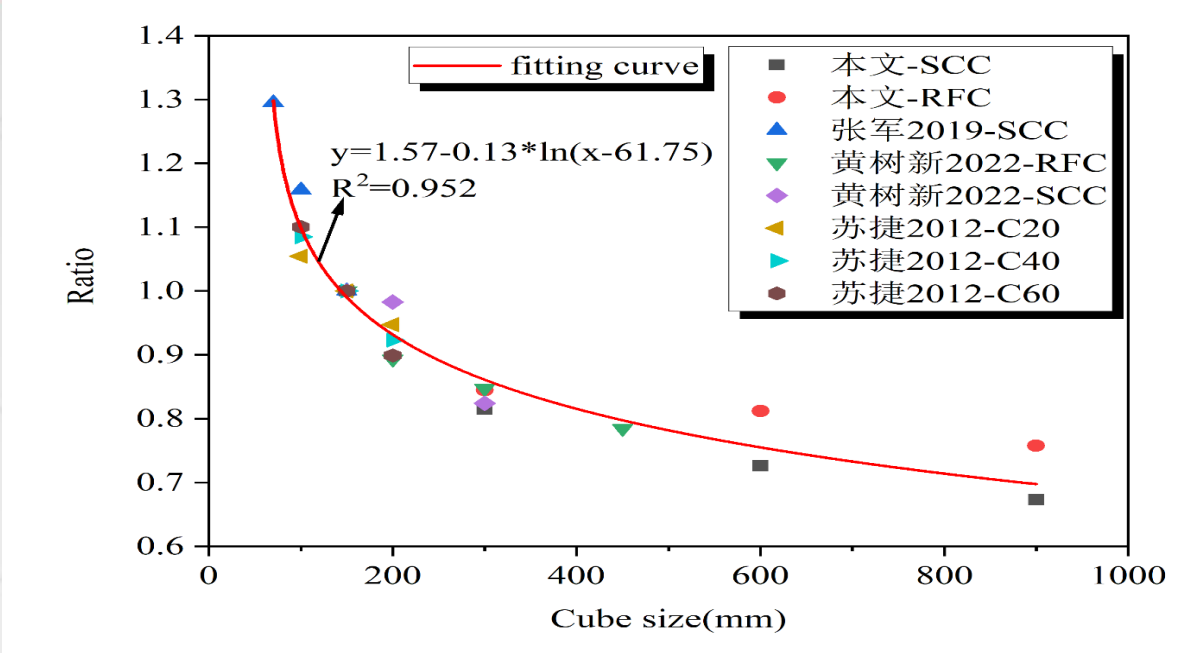
| | | |
|---|---|---|
| 抗拉压强度 | ○ | 界面细观指标参数 |
| 抗剪断强度 | | 动强度全曲线参数 |
| 极限拉伸值 | | 全尺寸真实参数库 |

# 2 堆石混凝土研究最新进展

## 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



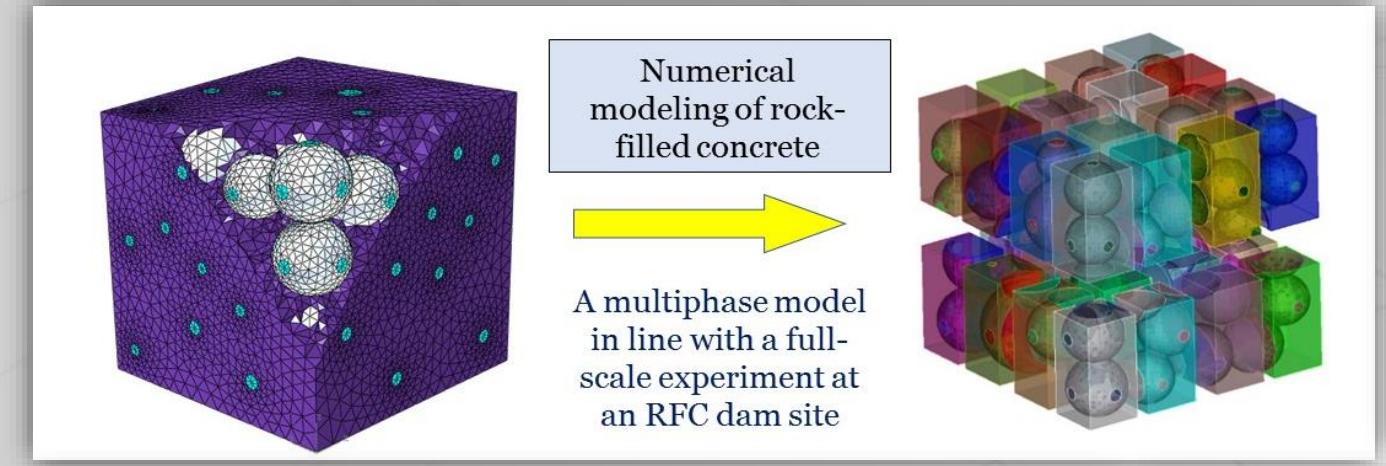


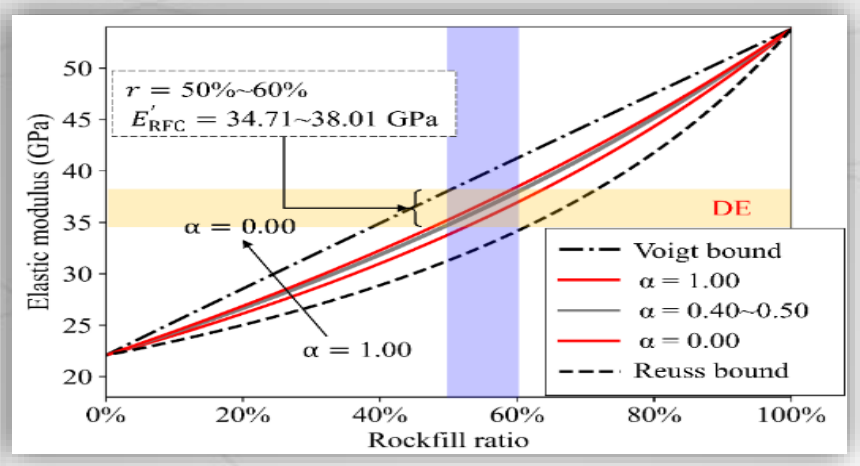


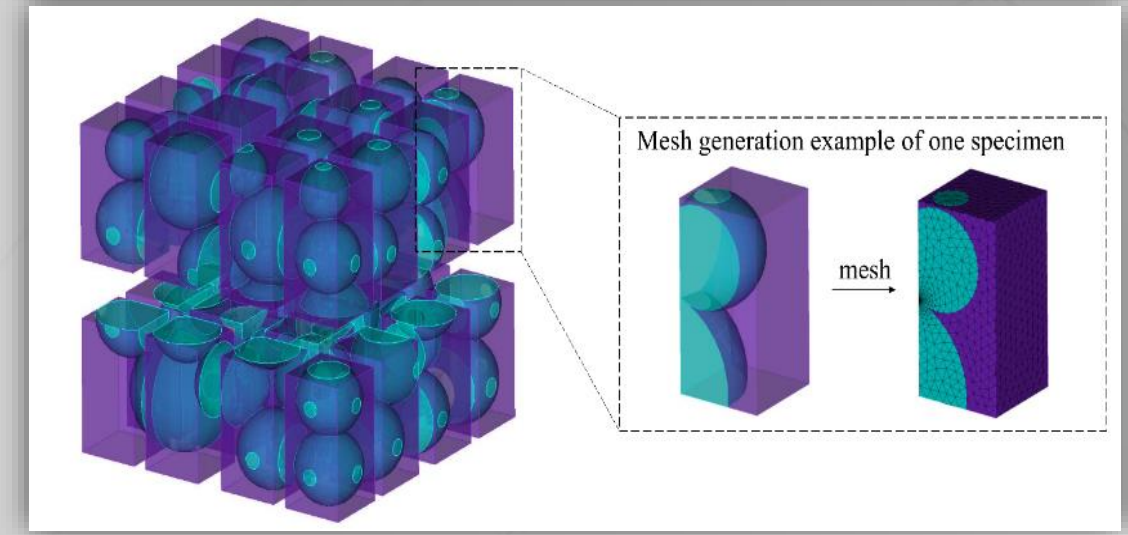


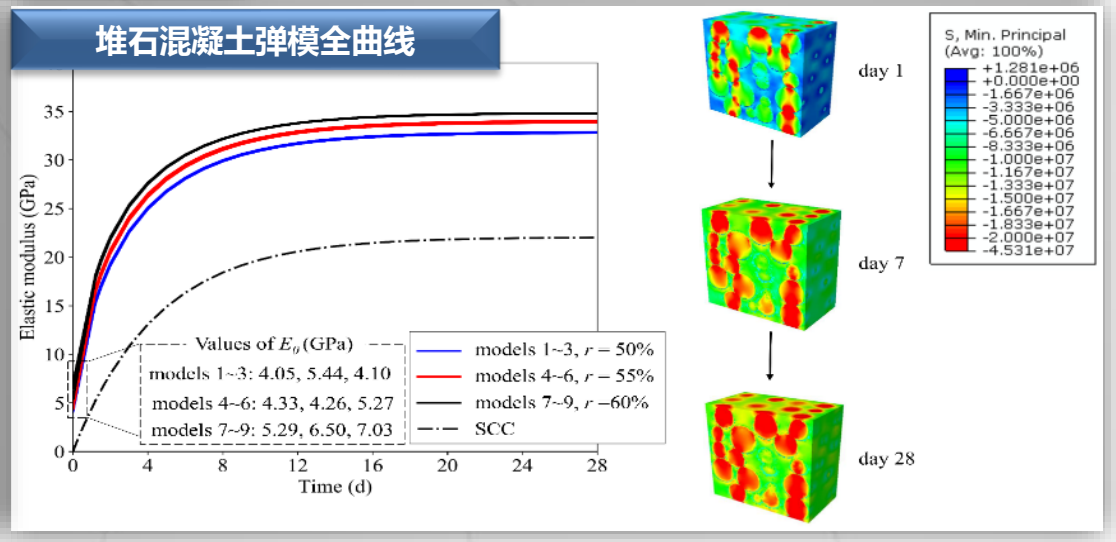
# 2 堆石混凝土研究最新进展

## Eshelby张量夹杂推导堆石混凝土等效弹模



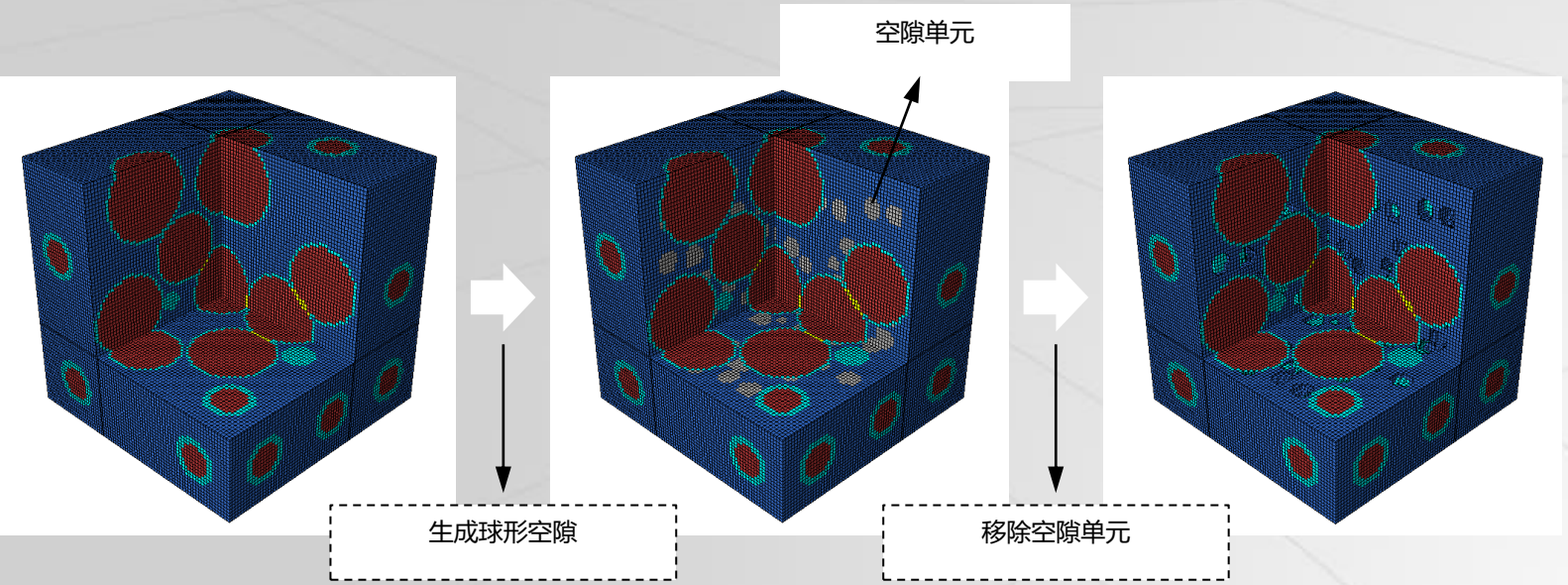



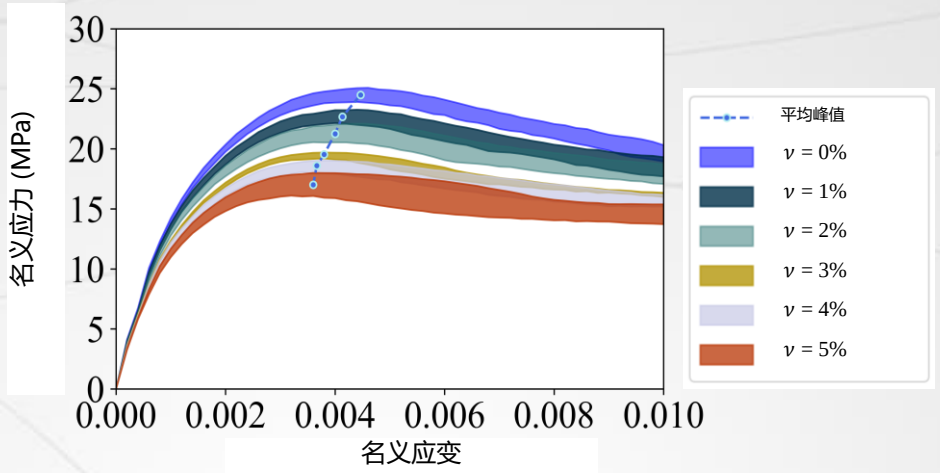



# 2 堆石混凝土研究最新进展

## 空隙影响



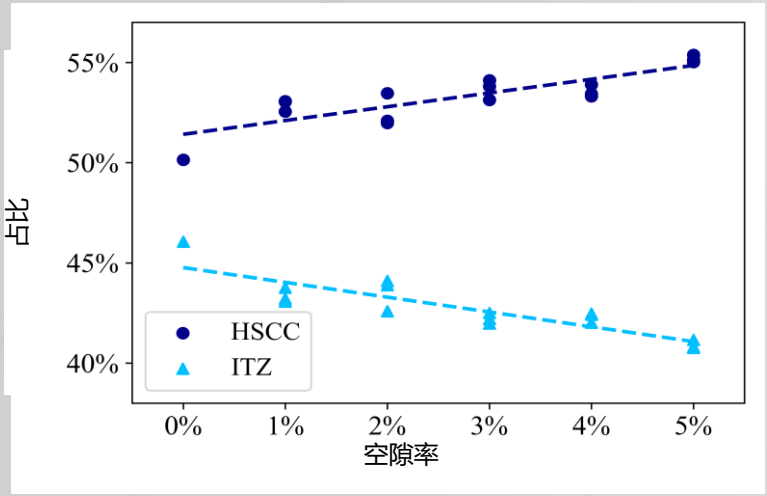




图 全部损伤单元中HSCC和ITZ占比

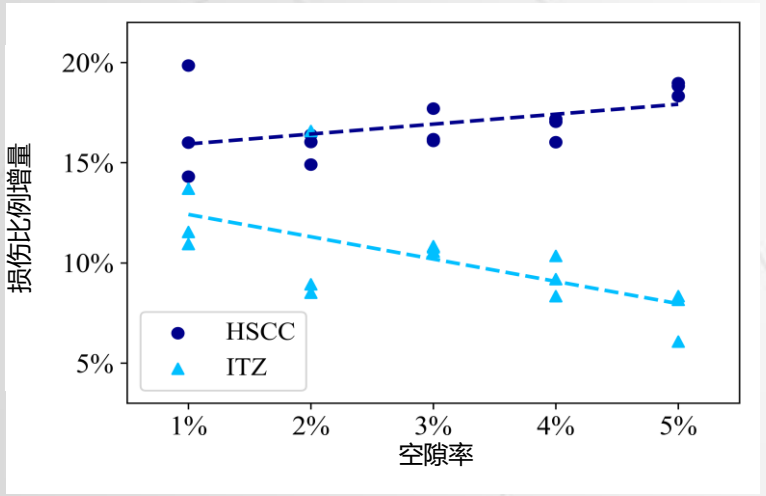
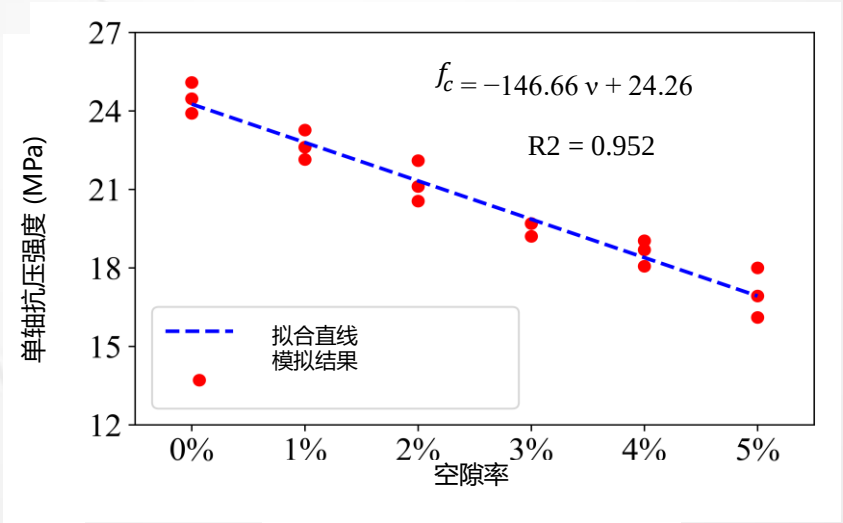



图 空隙周围HSCC和ITZ单元损伤比例增量

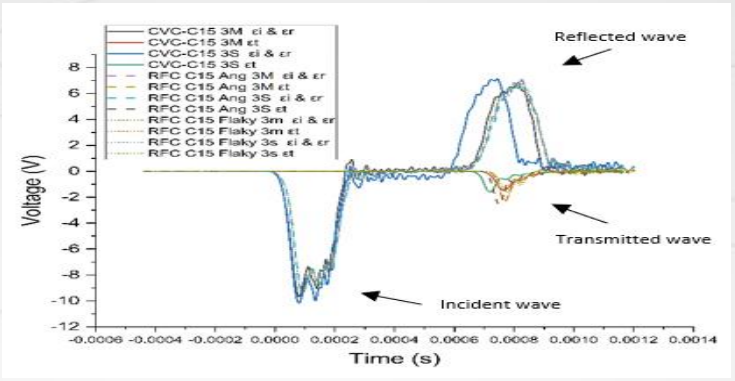


# 2 堆石混凝土研究最新进展

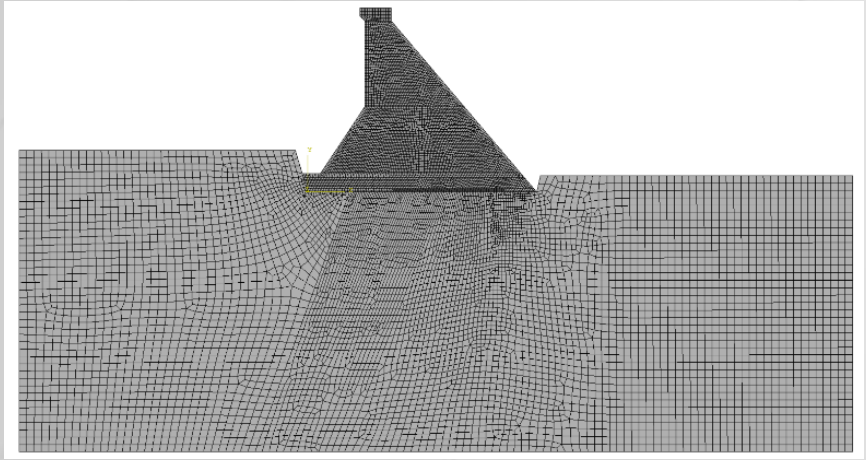
## Hopkinson动力试验

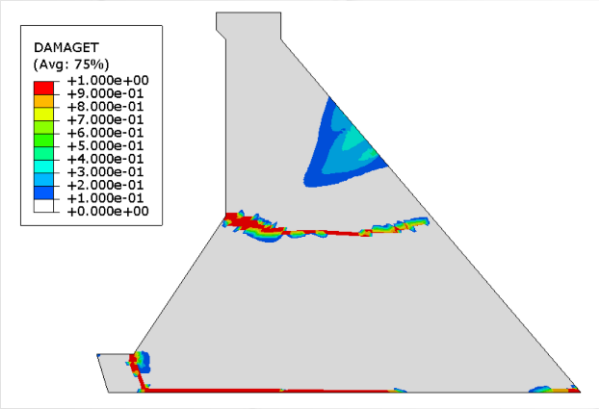




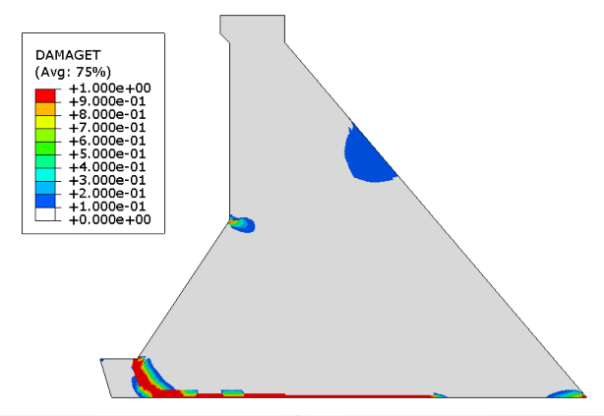



## Balakot抗震分析






(a) Conventional vibrating concrete dam




(b) Rock-filled concrete dam

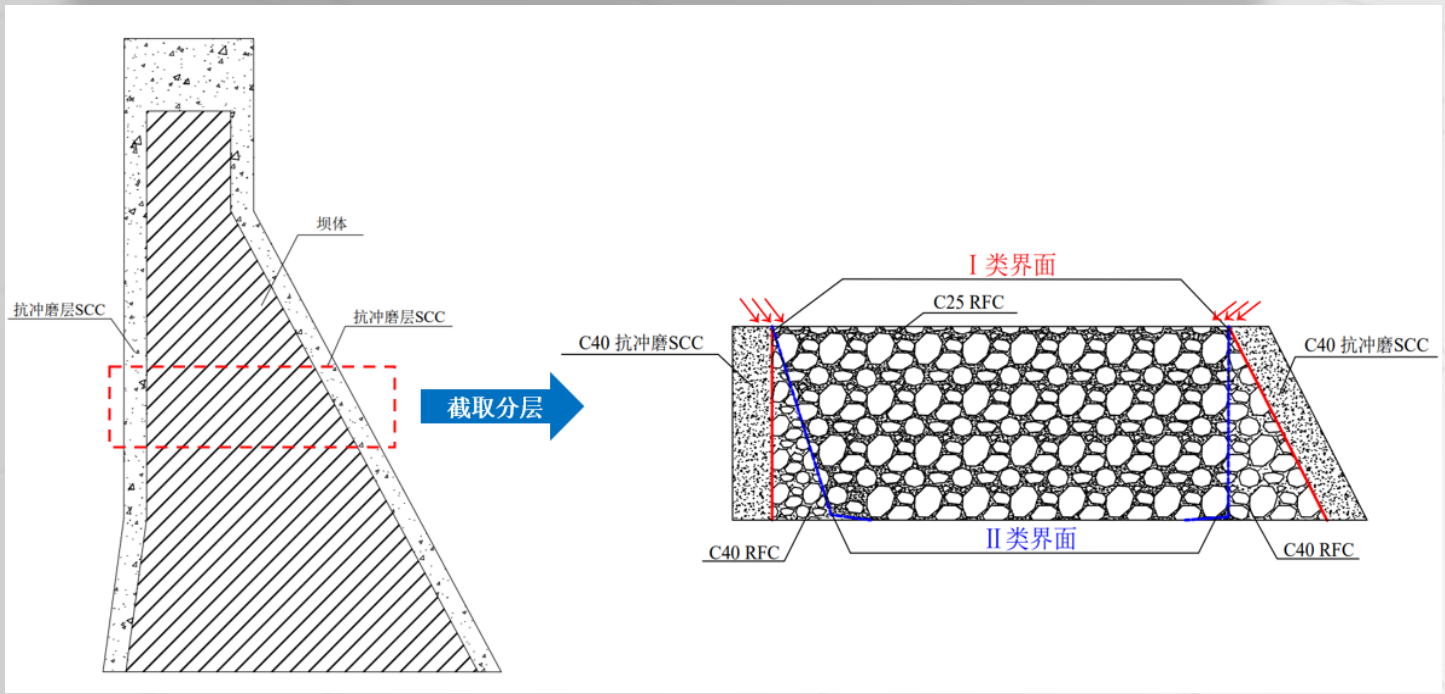
## 堆石混凝土堆石品质要求

| 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/m$^2$ )

超过规范要求和东庄企业标准7.9h/ (kg/m$^2$)

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

# 2 堆石混凝土研究最新进展

## 东庄堆石混凝土二道坝



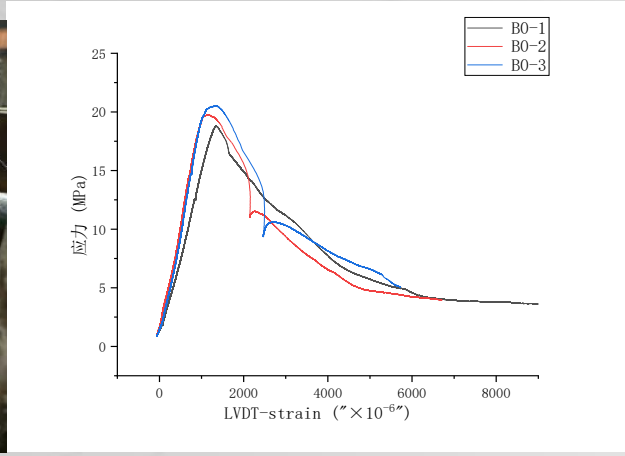

## 叶巴滩堆石混凝土二道坝



# 2 堆石混凝土研究最新进展

## 动强度试验





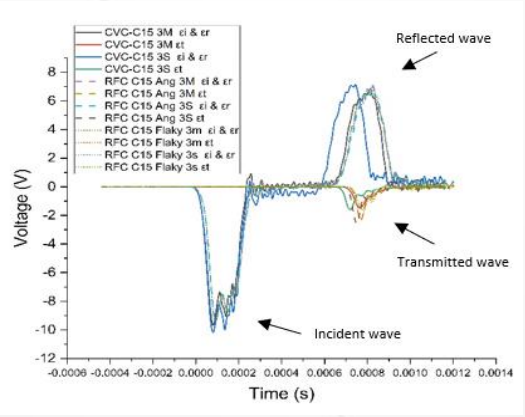

| 试件尺寸 | 编号 | 应变率 | | |
|---|---|---|---|---|
| | | $10^{-5}$/s | $10^{-4}$/s | $10^{-3}$/s |
| 100*100*200mm | 平均抗压强度（Mpa） | 21.207 | 22.690 | 23.195 |
| | $f_d/f_c$ | - | 1.070 | 1.094 |
| 150*150*300mm | 平均抗压强度（Mpa） | 19.671 | 20.789 | 22.381 |
| | $f_d/f_c$ | - | 1.057 | 1. 138 |

## Hopkinson试验





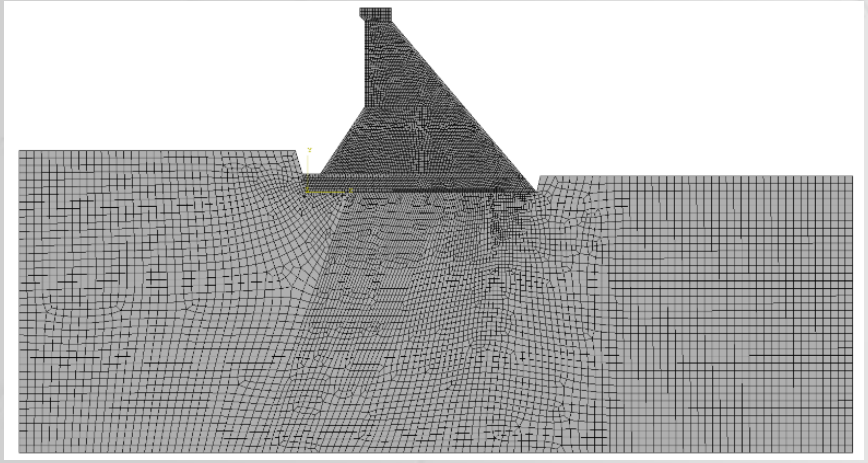


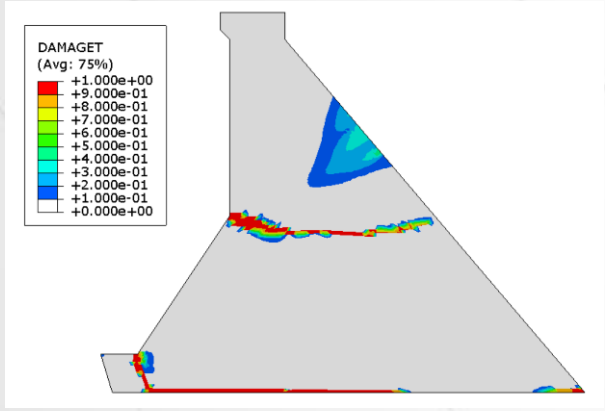


## 堆石混凝土坝抗震分析

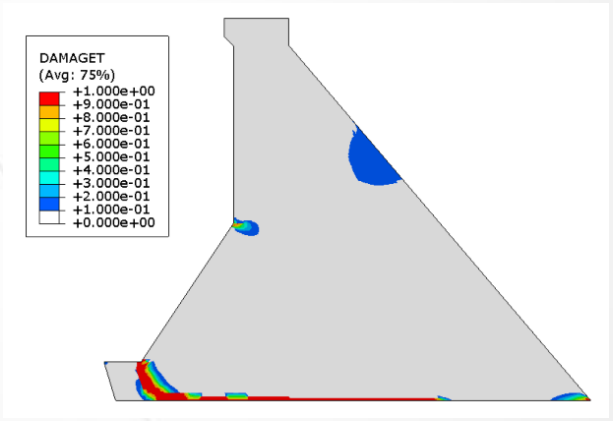
**巴基斯坦Balakot重力坝：坝高50m**

| | 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

# 2 堆石混凝土研究最新进展












# 2 堆石混凝土研究最新进展

# 2 堆石混凝土研究最新进展

## 国际大坝委员会堆石混凝土坝研讨会









# 2 堆石混凝土研究最新进展

## 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

458

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 →

# 2 堆石混凝土研究最新进展

**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》**

# 报告提纲

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

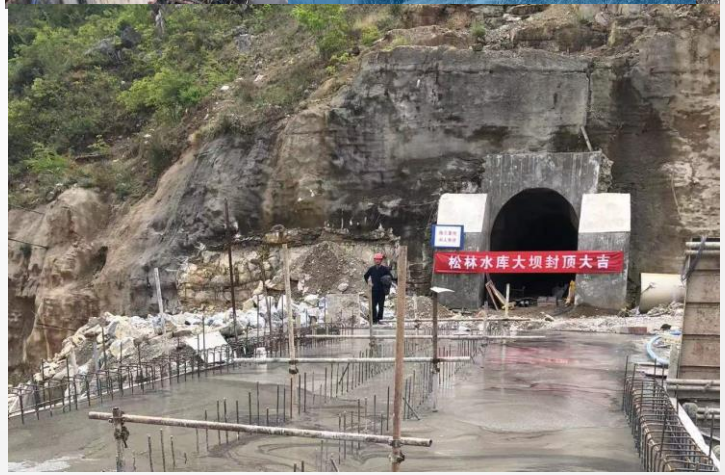
# 3 堆石混凝土坝工程应用

**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



# 3 堆石混凝土坝工程应用

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。





# 3 堆石混凝土坝工程应用

福建省溪源水库**堆石混凝土重力坝**，坝高77m





# 3 堆石混凝土坝工程应用

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**。











# 3 堆石混凝土坝工程应用

**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。**






# 3 堆石混凝土坝工程应用

**晓龙沟堆石混凝土坝，坝高44m，坝顶海拔3956m。**





# 3 堆石混凝土坝工程应用

## 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

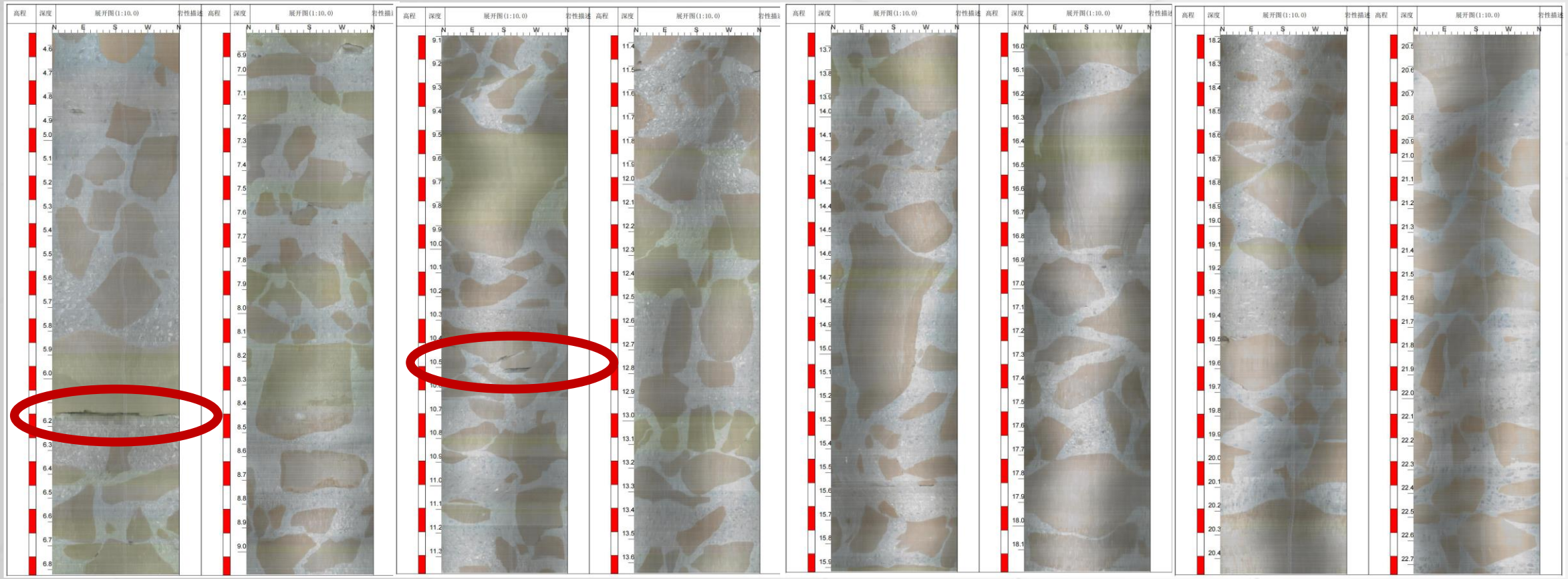
沙千水库位于贵州省遵义市，**堆石混凝土拱坝**，最大坝高66m

采用**不分纵横缝、全断面整体上升**浇筑，堆石采用砂岩






# 3 堆石混凝土坝工程应用



# 3 堆石混凝土坝工程应用

| 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**







# 3 堆石混凝土坝工程应用

## 安哥拉Niobonga堆石混凝土坝正在浇筑，坝高32米，坝顶长507米












# 报告提纲

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

# 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

# 4 堆石混凝土坝的未来展望

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/

清華大學

Tsinghua University