



矿山边坡安全风险预警与灾害防控应急管理部重点实验室

Key Laboratory of Mine Slope Safety Risk Warning and Disaster Prevention and Mitigation,
Ministry of Emergency Management

尾矿库溃坝模拟与分析的应用与实践

张 超

中国科学院武汉岩土力学研究所

岩土力学与工程安全全国重点实验室

矿山边坡安全风险预警与灾害防控应急部重点实验室

2025 年 5 月



中国科学院武汉岩土力学研究所

INSTITUTE OF ROCK AND SOIL MECHANICS
THE CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

汇报提纲



研究背景



尾矿库溃坝物理模型实验研究



尾矿库溃坝数值模拟研究



工程案例



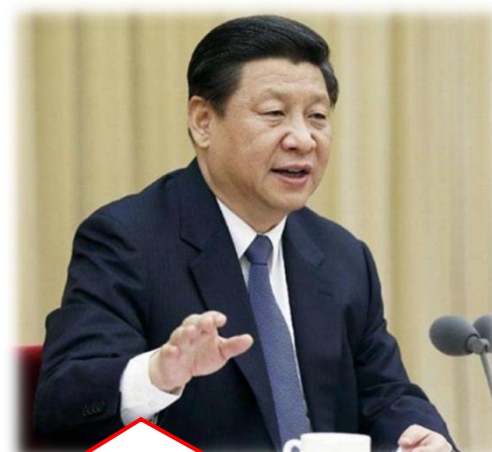
总结



1. 研究背景

1.1、矿产资源安全是生态文明建设的重要任务

- ❖ 2021年11月，中央政治局召开会议审议《国家安全战略（2021-2025年）》时提出“要确保能源矿产安全”，**矿产安全首次上升到国家战略**
- ❖ 矿产资源的开采会产生大量矿山固体废弃物，其堆存后形成尾矿库等矿山固废堆场**数量多、分布广、灾害风险高、事故后损失大**

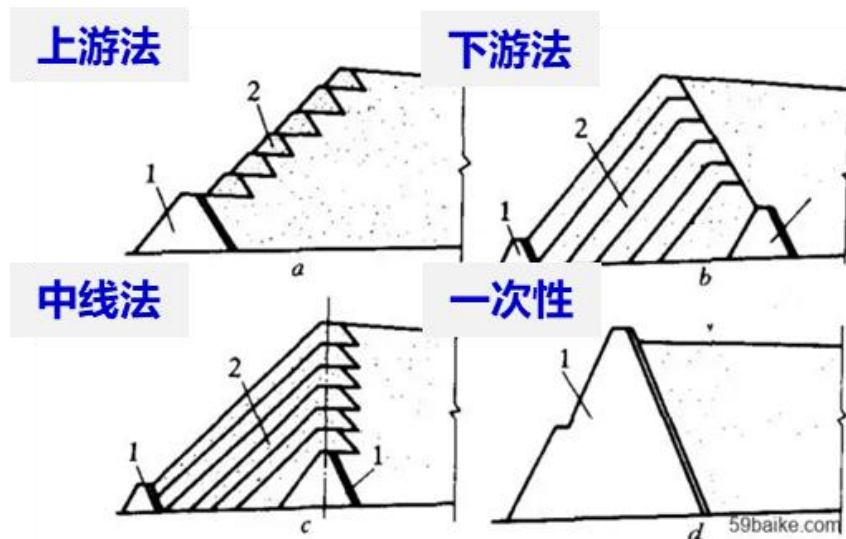


“要确保能源矿产安全”

1. 研究背景

1.2、尾矿坝简介

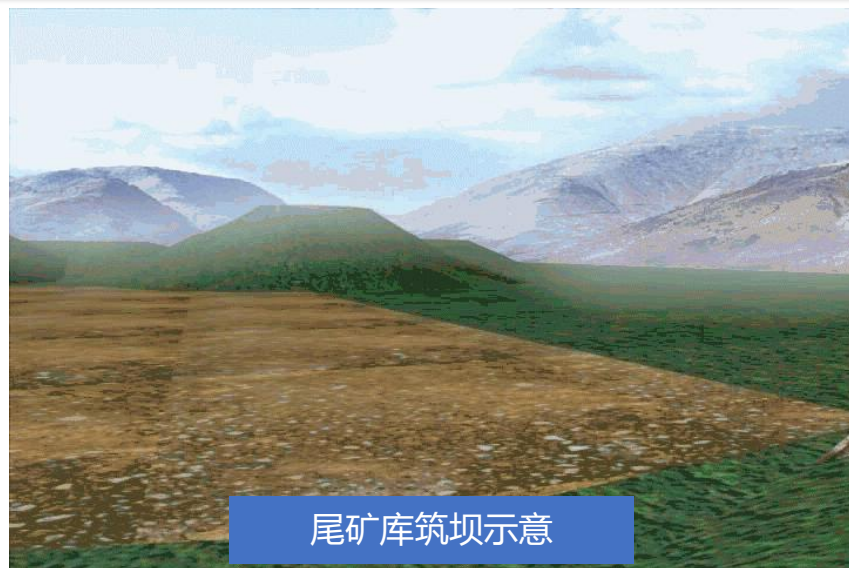
- ❖ 尾矿坝是矿业工程中用于储存矿石加工后产生的尾矿（废料）的重要设施，尾矿通常由**水、细颗粒矿物、化学残留物等组成**，可能含有重金属或其他有害物质，若处理不当会对环境和人类健康造成严重威胁。尾矿坝的设计和管理直接关系到矿山安全和生态保护。
- ❖ 依据筑坝类型可以将尾矿坝分为：**上游式、中线式和下游式尾矿坝**



1. 研究背景

1.3、尾矿库为人造重大危险源

- ❖ 尾矿是矿石选别后的必然产物，堆存尾矿的场所为尾矿库，尾矿库被列为我国安全生产领域的**重大危险源之一**，尾矿库溃坝给下游人民生命财产安全、生态环境带来巨大威胁



尾矿库筑坝示意

全国现有尾矿库
4919座

最大设计坝高
325m



2008年山西襄汾“9.8”尾矿库溃坝



2019年巴西fundao“1.25”尾矿库溃坝



2021年云南神川“8.28”尾矿库泄漏



2020年黑龙江伊春“3.28”尾矿库泄漏

1. 研究背景

1.4、尾矿坝的溃坝研究现状

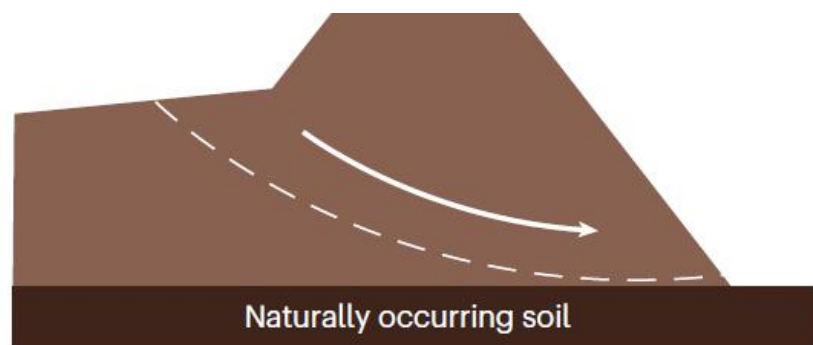
- ❖ 截至2024年4月，我国尾矿库数量降至**4919**座，较2020年减少**32.4%**，但仍远超其他国家
- ❖ 我国尾矿库中风险较高的“头顶库”（下游1公里内有居民或设施的尾矿库）数量较2020年下降**40.1%**，但仍有较大治理压力



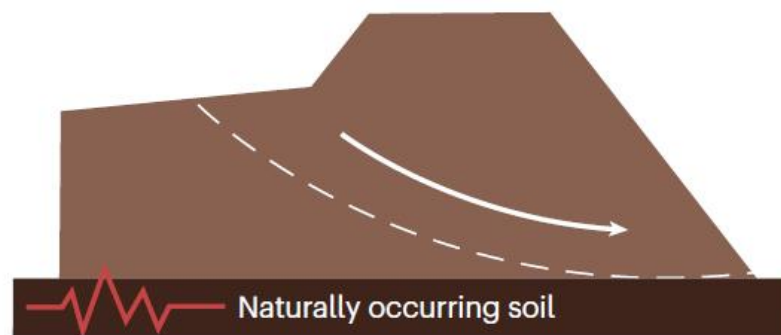
1. 研究背景

1.5、溃坝模式多样

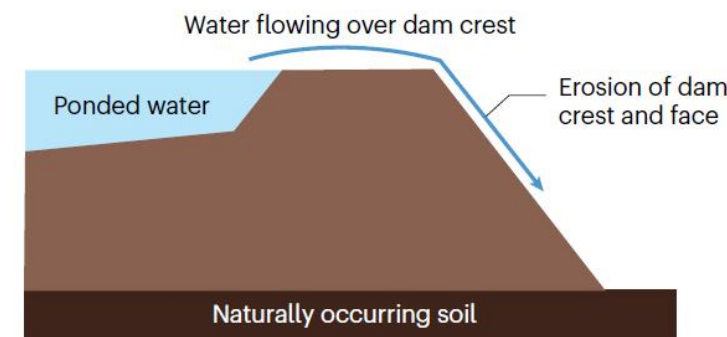
❖ 尾矿坝典型溃坝致灾模式，其中洪水漫顶、静态堆高和地震失稳事故概率最大



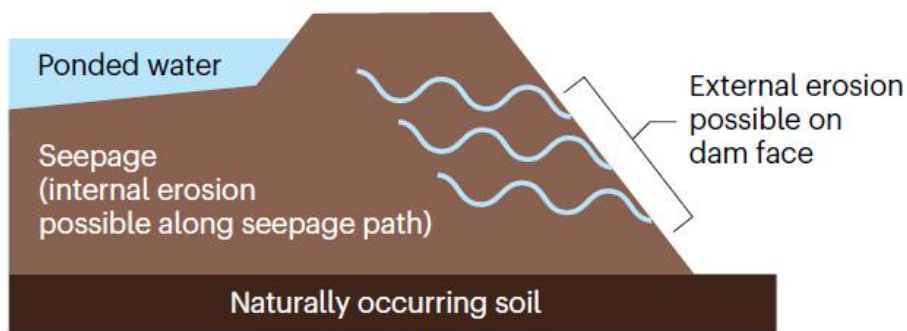
静态堆高 (17%)



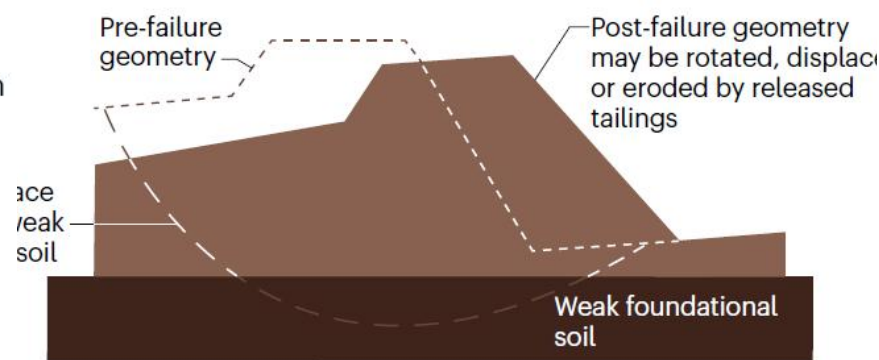
地震失稳 (16%)



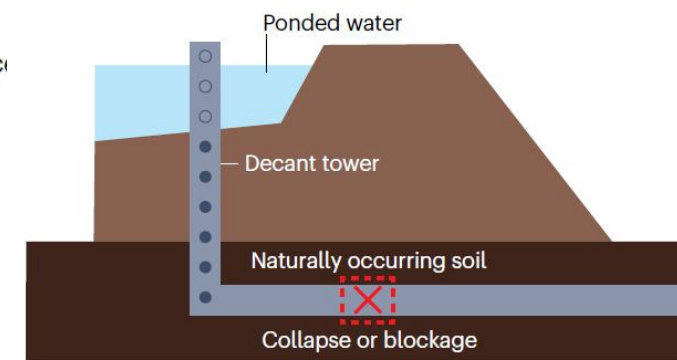
洪水漫顶 (19%)



渗透破坏 (9%)



软弱基底 (7%)

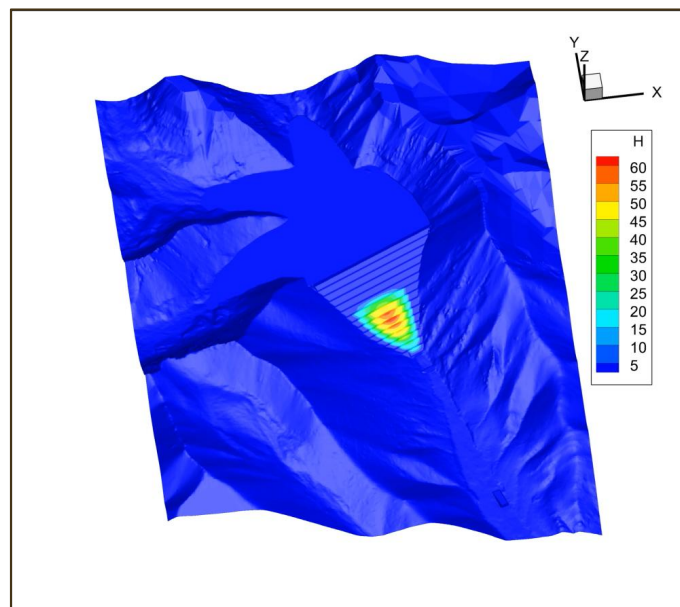


设施失效 (8%)

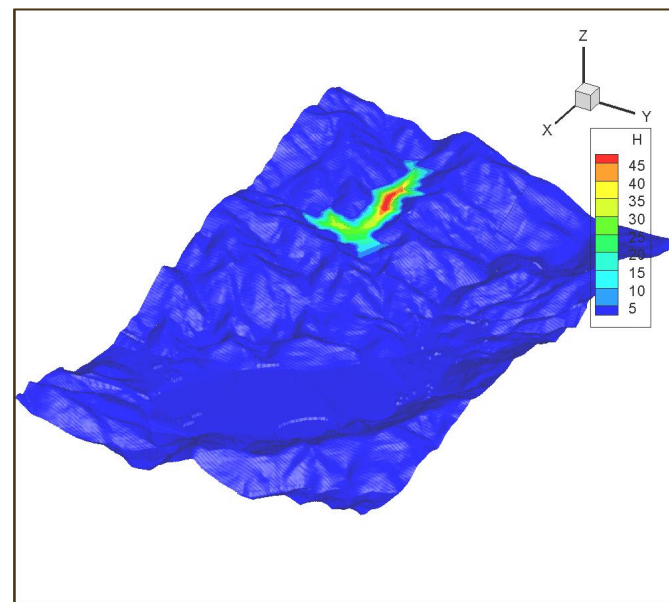
1. 研究背景

1.5、溃坝模拟失真的原因

- ❖ 现有的尾砂流的相态转化模型无法考虑尾砂流浓度的变化，导致尾砂流流变参数恒定，无法在流动过程中修正尾砂流流变参数
- ❖ 不同溃坝机制下的尾砂流溃坝流体流滑特性相差大，且失稳区域也存在巨大差异性



结构失稳溃坝流体



洪水漫顶溃坝流体

汇报提纲



研究背景



尾矿库溃坝物理模型实验研究



尾矿库溃坝数值模拟研究



工程案例



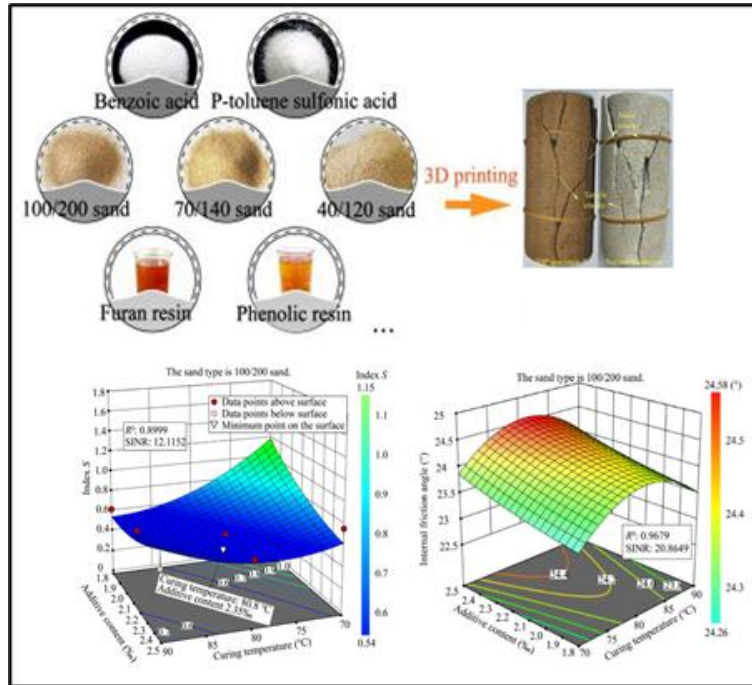
总结



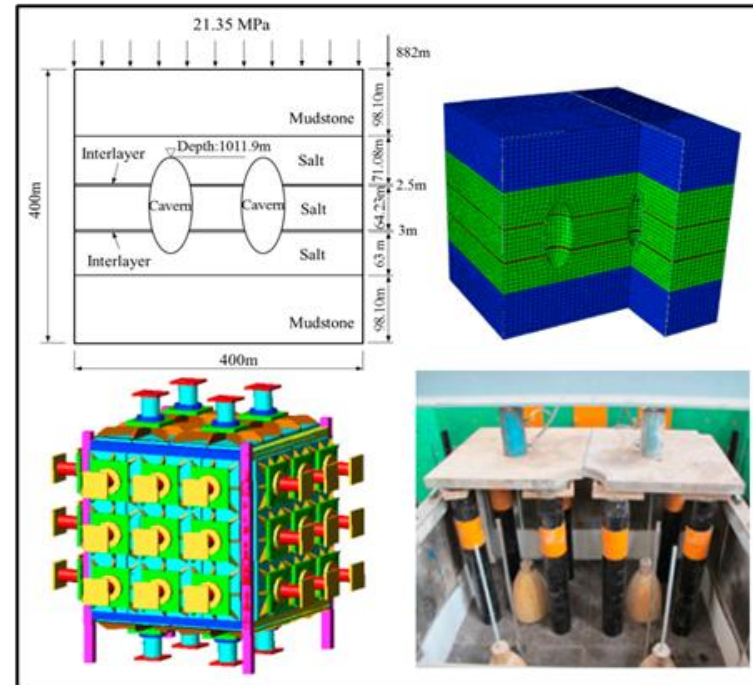
2. 尾矿库溃坝物理模型试验研究

2.1、物理模型基本要素

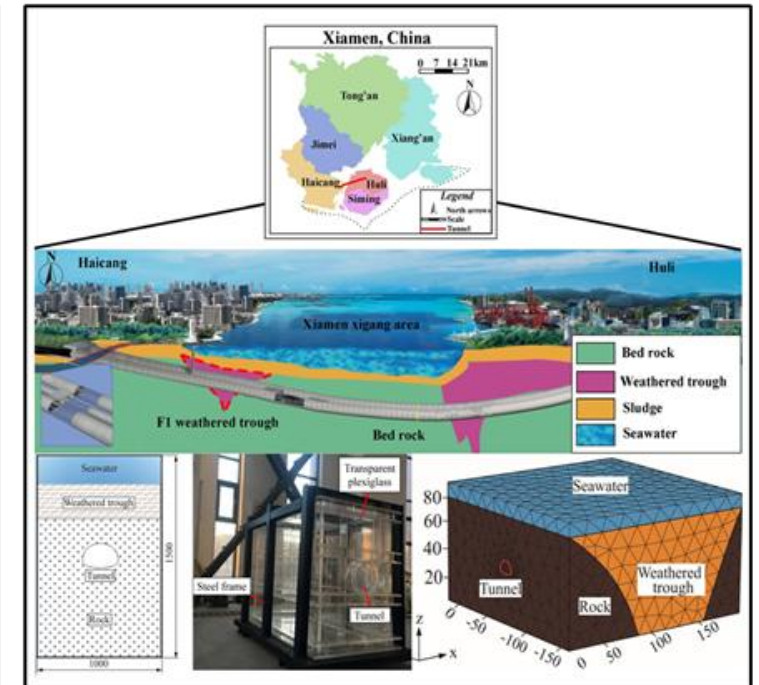
- ❖ 尾矿坝坡溃坝诱因多样，开展了**洪水漫顶**、**库岸边坡垮塌**和**堆高失稳**的尾矿坝坡溃坝模型试验
- ❖ 尾矿坝坡溃坝常常携带大量水，需精细考虑溃坝尾砂流对下游的影响



某3D打印材料模型试验



某深部储气盐穴模型试验



某海底隧道模型试验

2. 尾矿库溃坝物理模型试验研究

2.2、洪水漫顶致灾演化规律及预测模型

- ❖ 研发了**大型**尾砂流灾害大尺度室内物理模型装备
- ❖ 可模拟大比尺下真实赋存环境的放矿**筑坝与溃决致灾的时空演进全过程**



尾矿坝关渗透破坏溃口发展过程

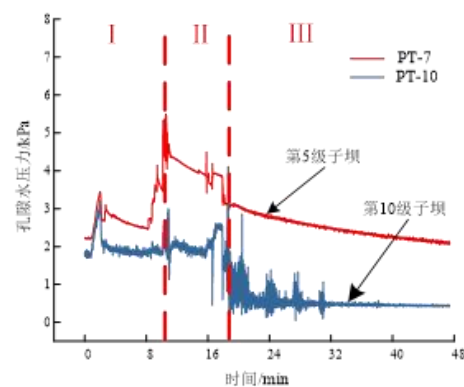
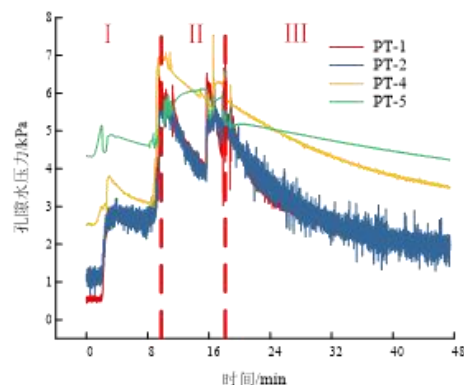


超10米量级的室内模型试验平台及装备
(12×10×4.5m)

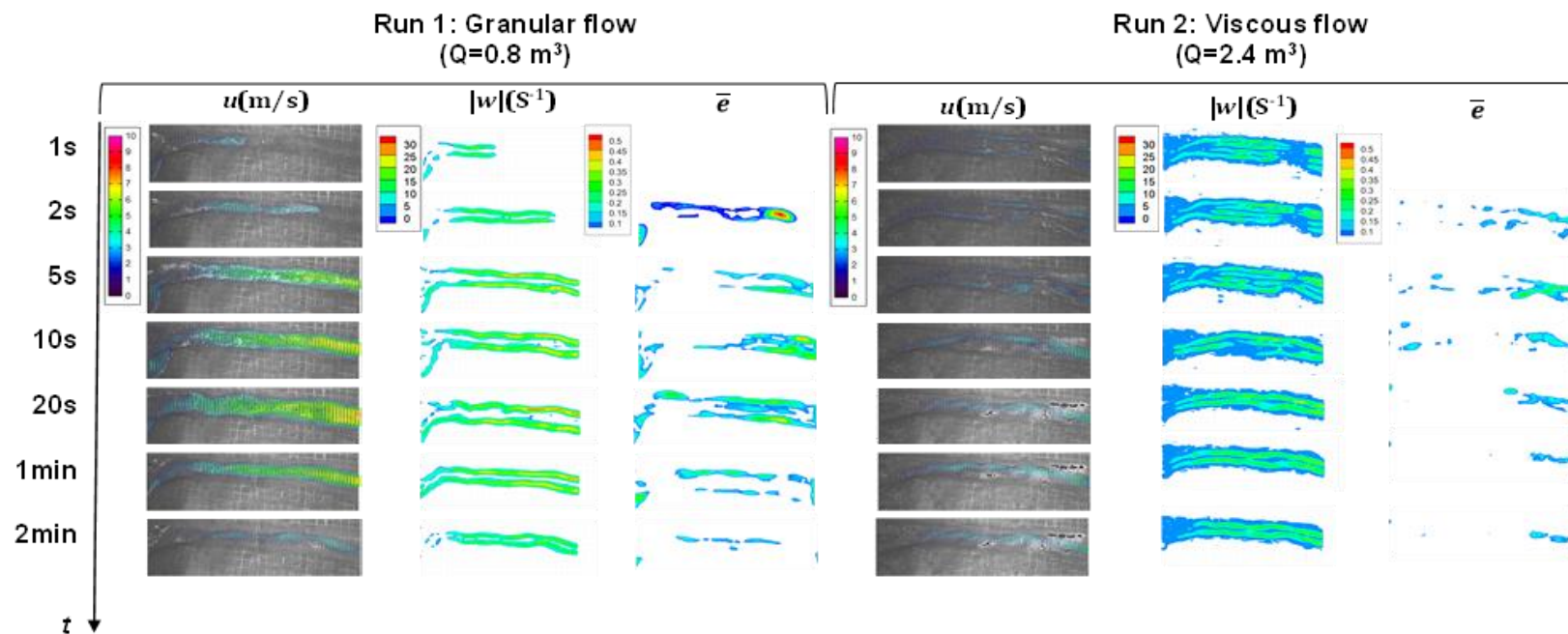
2. 尾矿库溃坝物理模型试验研究

2.2、洪水漫顶致灾演化规律及预测模型

- ❖ 总结了洪水漫顶致灾下孔隙水压力演化规律，处在坝体**外缘的孔压积累和消散相应更迅速**
- ❖ 洪水漫顶致灾下尾矿坝坡溃坝流体随含水量的增加展现出了由**颗粒流**向**粘性流**转化的现象



孔压传感器数据

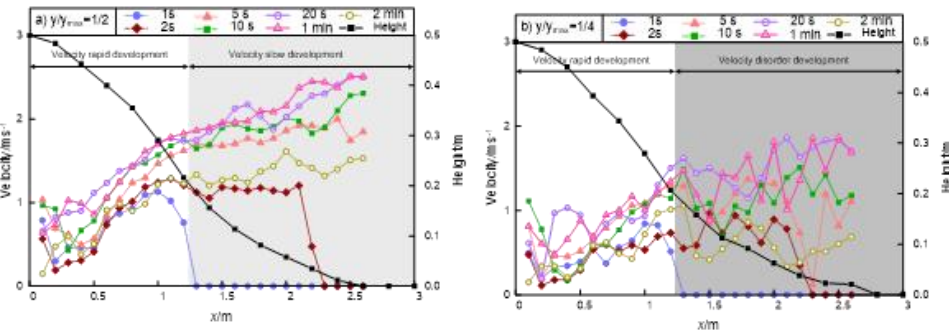


溃坝尾砂流状态描述

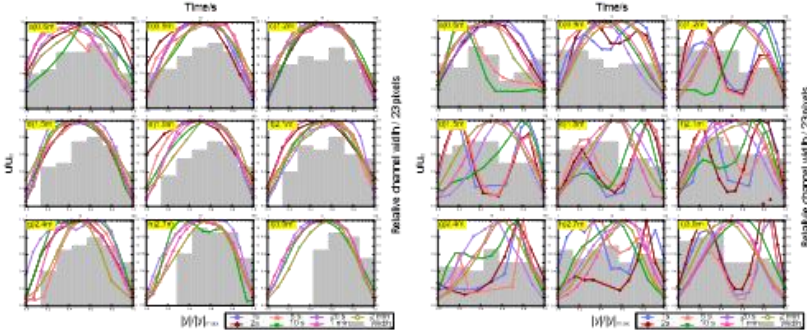
2. 尾矿库溃坝物理模型试验研究

2.2、洪水漫顶致灾演化规律及预测模型

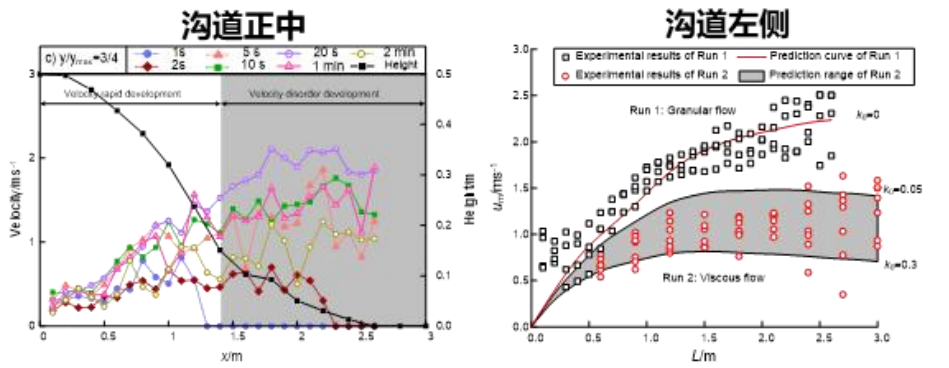
- ❖ 提出了溃坝尾砂流不同状态下**纵向流速预测模型**，根据地形快速预测溃坝尾砂流纵向流速
- ❖ 总结了三种横向流速类型，提出了不同溃流模式下**横向流速预测方程**



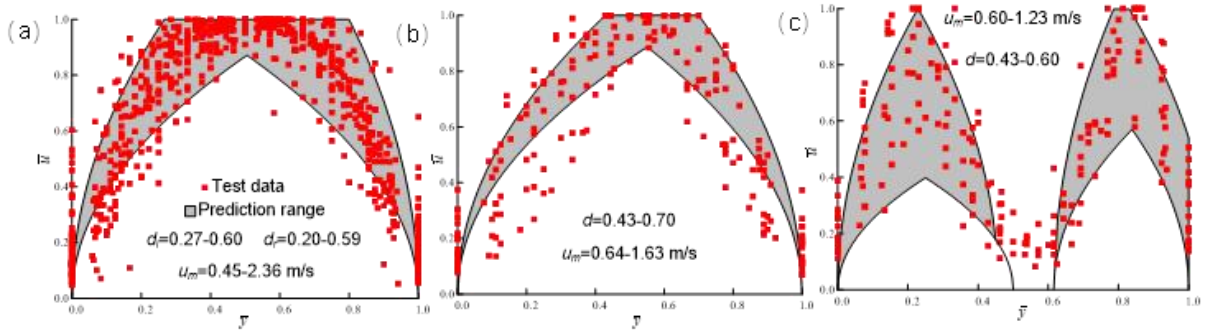
$$u_m = \sqrt{\frac{2gh_L + \alpha_1 u_0^2}{\alpha_2 + 2gk_0 L}}$$



$$\bar{u} = \bar{d}_r (2 - 2\sqrt{y})$$



沟道正中
沟道左侧
沟道右侧
不同溃流模式的溃坝流纵向最大流速预测

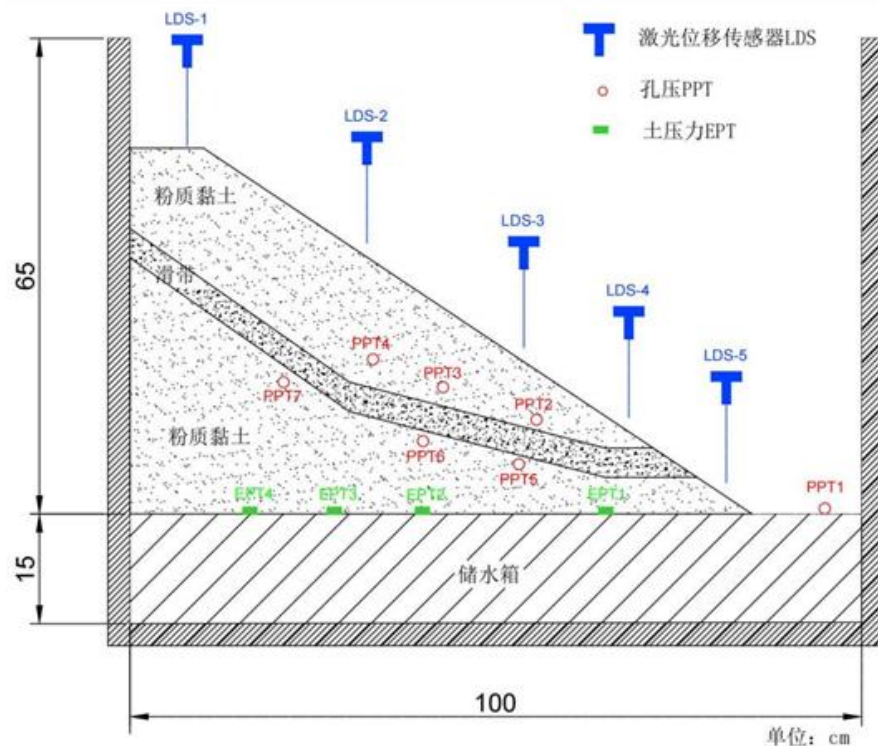


堆积坝体积变化统计结果

2. 尾矿库溃坝物理模型试验研究

2.3、库岸边坡垮塌致灾演化规律及预测模型

- ❖ 尾矿库水位上升易诱发尾矿库库区边坡失稳垮塌，为考虑水位上升速度及边坡整体软化影响，采用**离心物理模型试验**开展相关研究



某尾矿库岸边坡模型

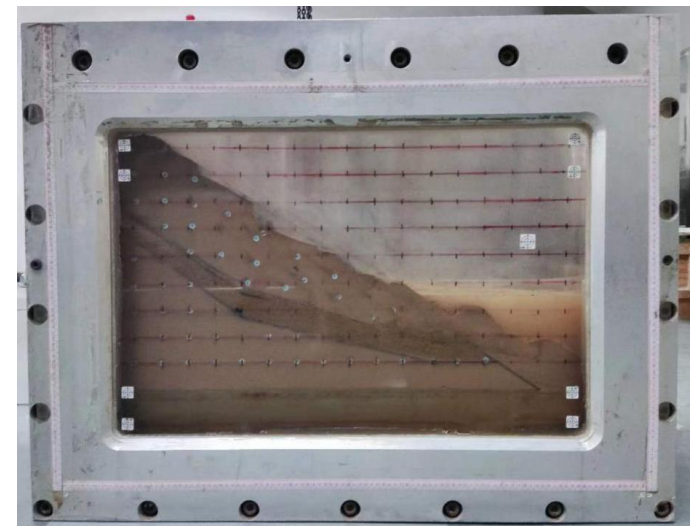
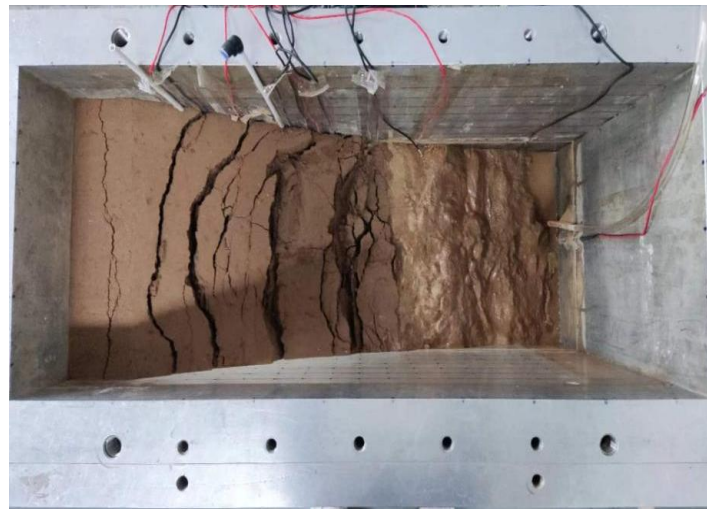


离心模型试验

2. 尾矿库溃坝物理模型试验研究

2.3、库岸边坡垮塌致灾演化规律及预测模型

- ❖ 通过视频实时监控表明，当水位上升时，在液面上部坡面产生**细小裂纹**，底部**土体液化**发生破坏；随后逐级产生裂缝，最后库岸边坡发生垮塌

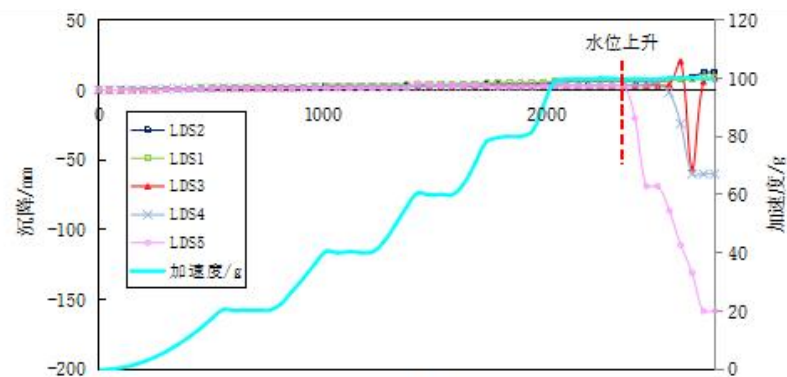


库岸边坡垮失稳全过程

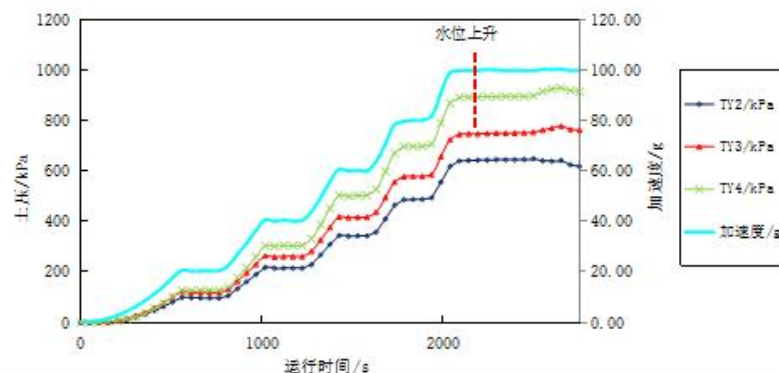
2. 尾矿库溃坝物理模型试验研究

2.3、库岸边坡垮塌致灾演化规律及预测模型

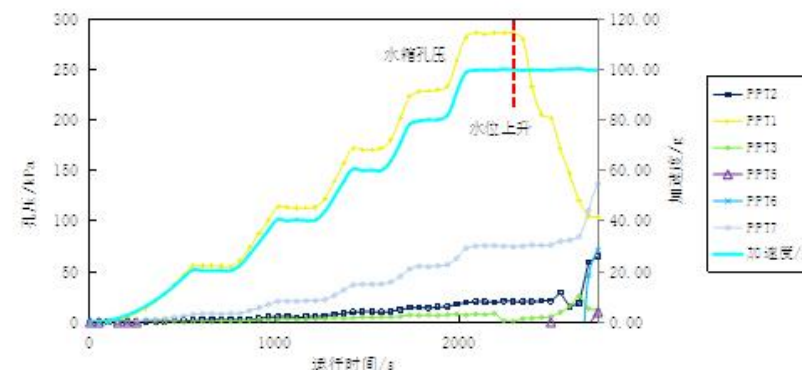
- ❖ 水位升高后边坡逐渐产生滑动，孔压逐渐增大
- ❖ 滑带上部坡体产生了**较大滑坡变形**，滑带下部坡体变形较小，表明**水位上升浸泡导致滑带软化**



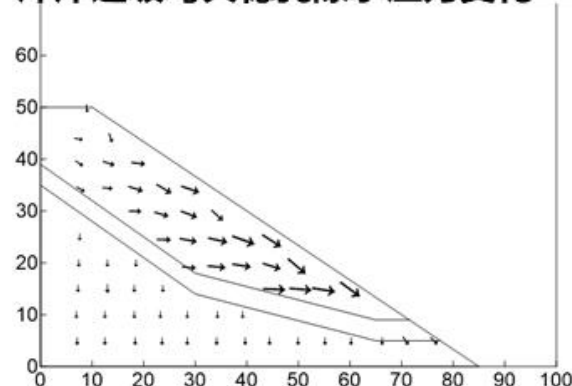
库岸边坡垮失稳坡面位移变化



库岸边坡垮失稳坡面土压力变化



库岸边坡垮失稳孔隙水压力变化



库岸边坡垮失稳断面场位移

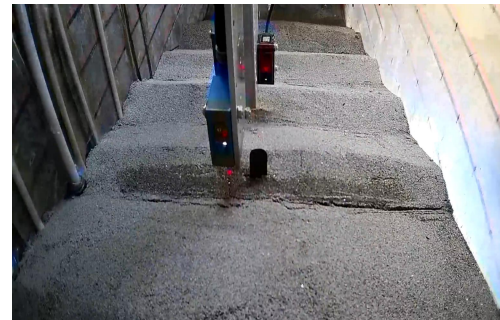
2. 尾矿库溃坝物理模型试验研究

2.4、堆高溃坝致灾演化规律及预测模型

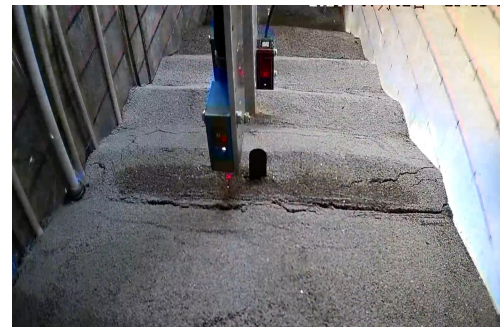
- ❖ 揭示了尾矿坝堆高过程中**失稳-流滑破坏演化过程**，通过坝面产生的细小裂缝不断发育至坝体产生失稳破坏



堆高过程模拟失稳破坏全过程



逐级加载阶段：坝面产生细小裂缝



初始阶段：细小裂缝不断发育并贯通



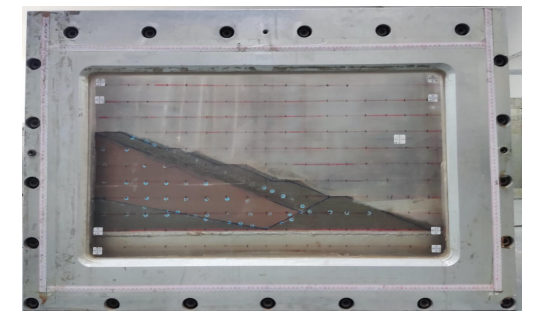
变形阶段：上部变形较大，产生多处破坏



破坏阶段：坝体产生整体失稳破坏



尾矿坝最终破坏形态（俯视）

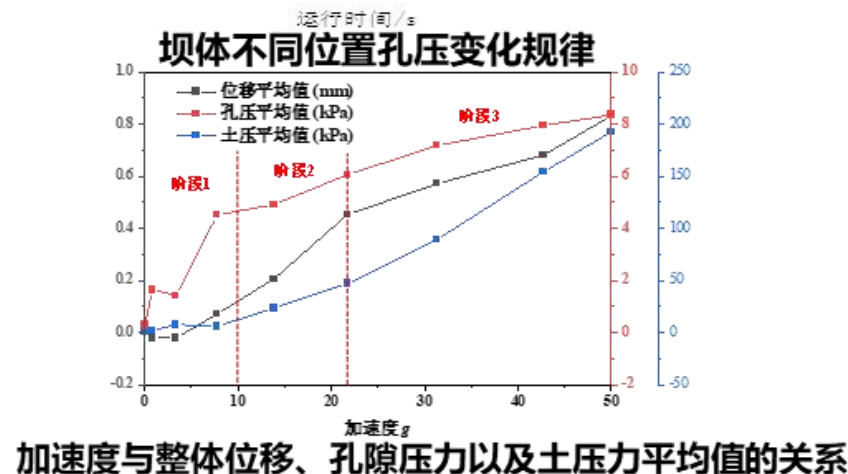
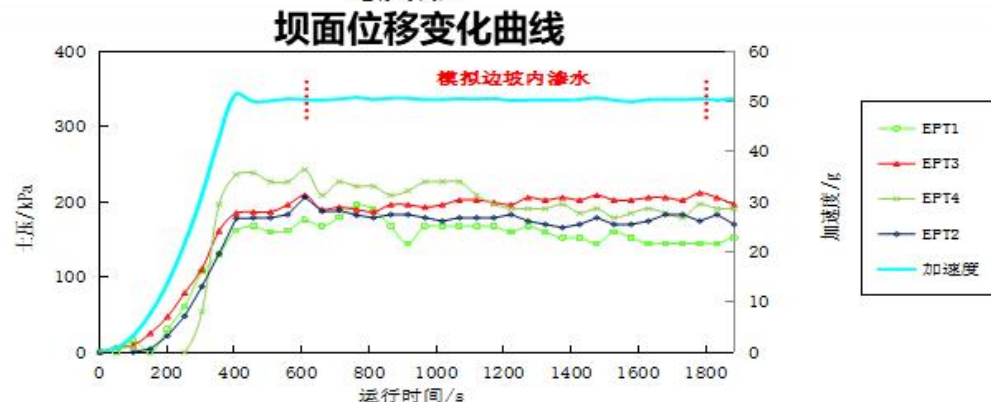
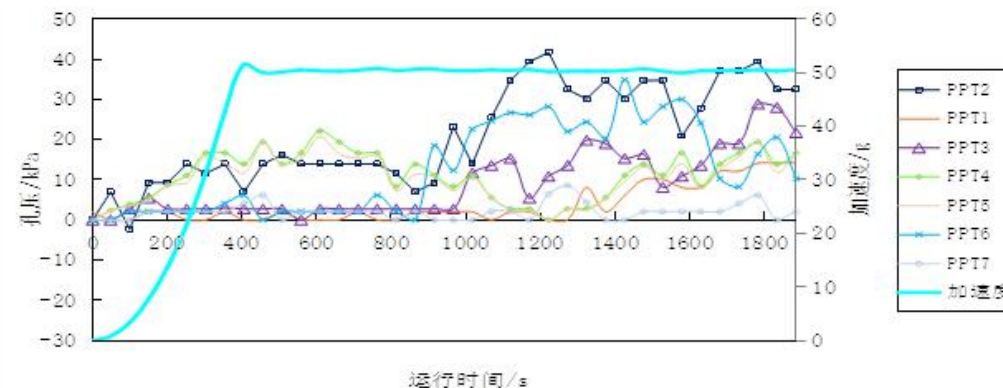
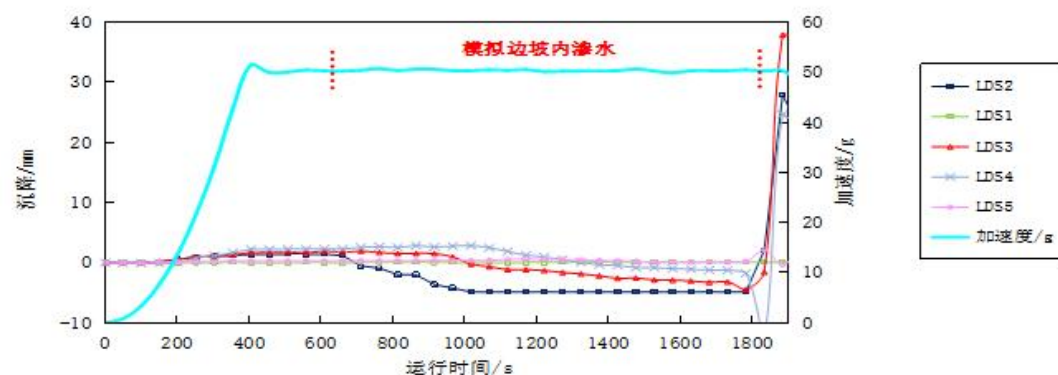


尾矿坝最终破坏形态（侧视）

2. 尾矿库溃坝物理模型试验研究

2.4、堆高溃坝致灾演化规律及预测模型

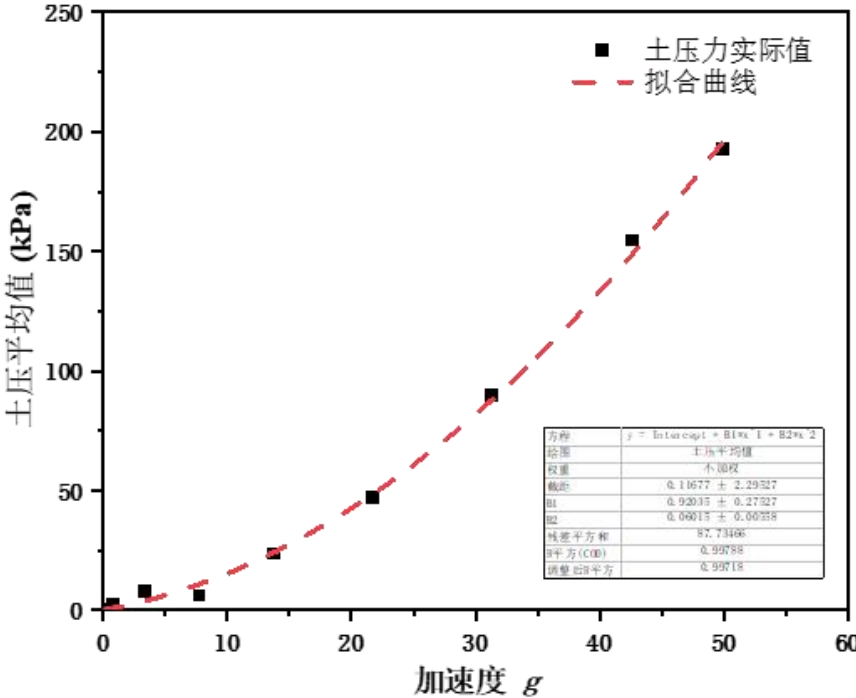
- ❖ 推导了不同尾矿筑坝速率与坝体稳定性的关系，总结了尾矿坝堆高过程的土体参数的土压力与孔隙水压力随着堆坝速率增加而加速增长演化规律，为监测指标的**风险态势判别提供依据**



2. 尾矿库溃坝物理模型试验研究

2.4、堆高溃坝致灾演化规律及预测模型

❖ 提出了不同堆高阶段影响下尾矿坝堆高溃坝安全预警分级准则



加速度与土压力的关系曲线

试验结果表明:

- I 级: $vr < 2.6$ m/年, 坝体整体位移基本不发生变化
- II 级: $2.6 \text{ m/年} \leq vr < 5.6 \text{ m/年}$, 坝体位移稍有滑动的趋势
- III 级: $5.6 \text{ m/年} \leq vr < 13.1 \text{ m/年}$, 孔隙水压力逐渐增大, 其波动幅度也随之增加
- IV 级: $vr \geq 13.1 \text{ m/年}$, 孔隙压力逐渐增大, 直至发生破坏



实际堆高速率与离心加速度的关系:
$$v_r = \frac{\sin \arctan i \cdot (0.12 + 0.92n + 0.06n^2)}{h_d \rho g t_m n^3}$$

实际堆高速率与土压力关系:
$$v_r = \frac{P_s \sin \arctan i}{h_d \rho g t_m n^3}$$

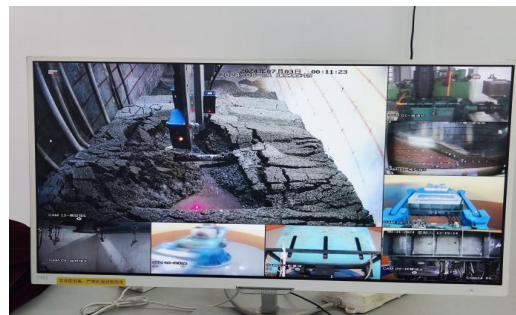
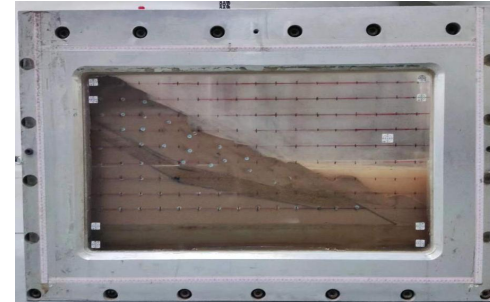
2. 尾矿库溃坝物理模型试验研究

2.5、尾矿坝溃坝模式总结

- ❖ 不同致灾模式下溃口分为两种，洪水漫顶形成的**冲刷溃口**和局部溃坝形成的**滑移溃口**
- ❖ 洪水漫顶破坏过程分为：漫过缺口产生水力冲刷逐渐加深溃口，最终形成贯穿整个坝体的溃口
- ❖ 局部失稳破坏面与**最危险滑动面**接近，通过三维潜在最危险滑动面可确定溃口形态



尾矿坝冲刷溃口



尾矿坝滑移溃口

汇报提纲



研究背景



尾矿库溃坝物理模型实验研究



尾矿库溃坝数值模拟研究



工程案例



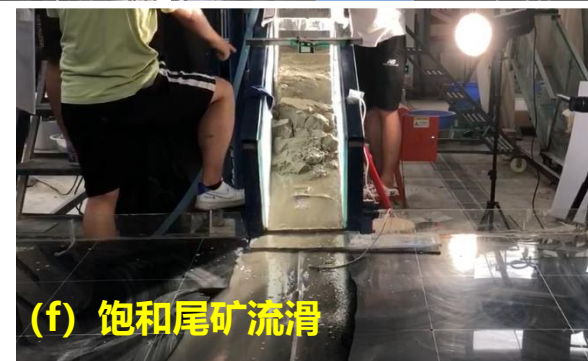
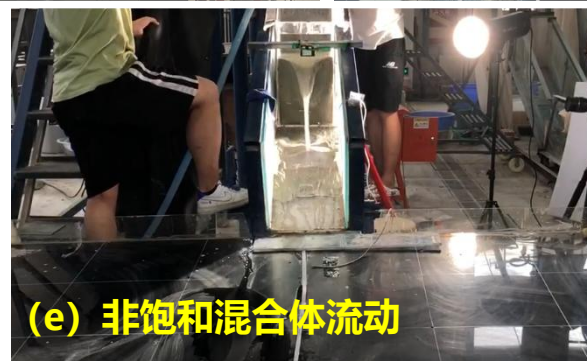
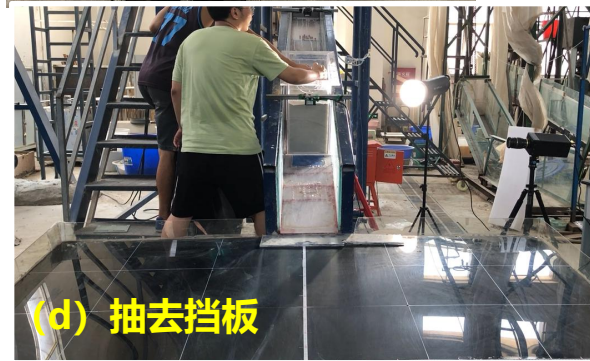
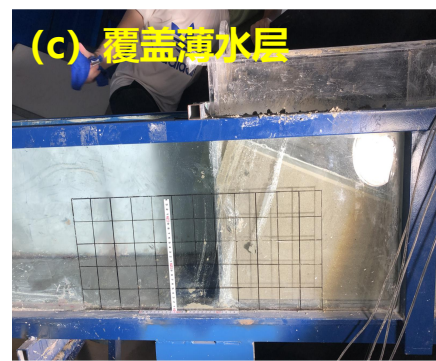
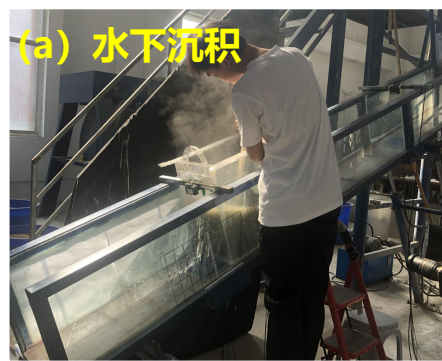
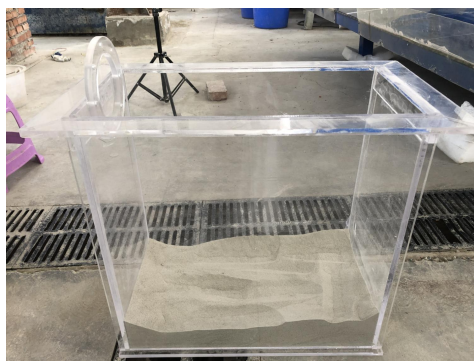
总结



3. 尾矿库溃坝数值模拟研究

3.1、尾矿流滑特性分析

- ❖ 不同流体类型的流态差别主要体现在**基底摩擦系数**、**孔压系数**和**粘聚力**（表观粘聚力值）
- ❖ 针对洪水漫顶和局部溃坝致灾模式，开展了饱和与非饱和流体尾矿的流滑特性滑槽实验，数值模拟流体参数可依据实际工况在两者间取值，本质上反映了**尾矿材料的残余强度**

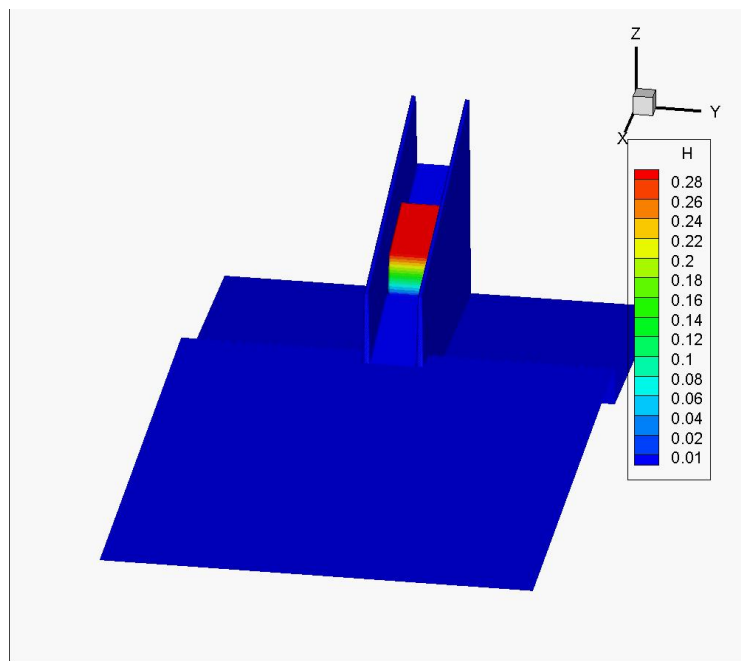


流滑试验过程

3. 尾矿库溃坝数值模拟研究

3.2、动力模型与计算方法

- ❖ 利用基于深度积分法和有限差分的大变形数值仿真软件**Massflow**开展尾矿库溃坝数值模拟
- ❖ 可考虑**复杂地形地貌**和沟床侵蚀等特征，适用于普遍的地表流灾害如山体滑坡、岩崩、雪崩、碎屑流、泥石流、溃坝等，可以模拟多层流和多相流灾害



流滑参数数值模拟反分析

三维Navier-Stokes方程进行深度积分，得到控制方程：

$$\frac{\partial(h)}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{v}_x)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}_y)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial(h\bar{v}_x)}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{v}_x^2 + k_{ap}g_z h^2 / 2)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}_x \bar{v}_y)}{\partial y} = g_x h - k_{ap}g_z h \frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{(\tau_{xx})_b}{\bar{\rho}}$$

$$\frac{\partial(h\bar{v}_y)}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{v}_x \bar{v}_y)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}_y^2 + k_{ap}g_z h^2 / 2)}{\partial y} = g_y h - k_{ap}g_z h \frac{\partial z_b}{\partial y} - \frac{(\tau_{yy})_b}{\bar{\rho}}$$

尾砂溃坝流深度积分法简化模型

3. 尾矿库溃坝数值模拟研究

3.3、尾砂流相态转换本构模型

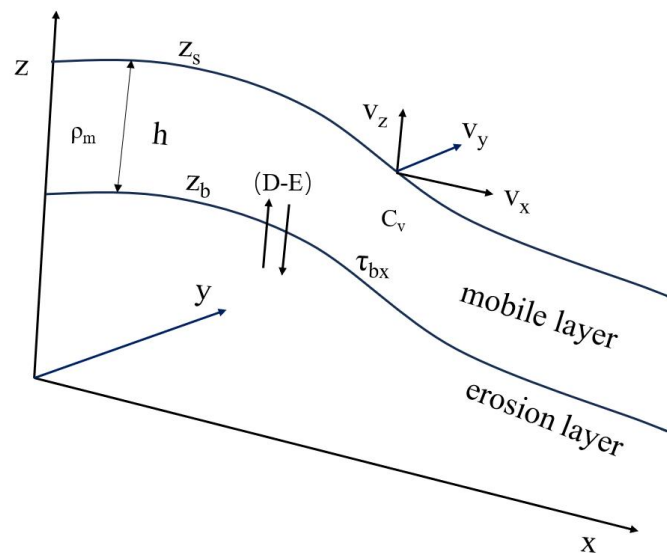
- ❖ 尾矿相态转换本构模型：引入基于浓度相关的宾汉姆塑性本构模型与二相流基本理论，构建了洪水漫顶工况下尾砂流的动力学模拟框架。

$$\frac{\partial X}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = S; \quad \frac{\partial X}{\partial t} + \frac{\partial G}{\partial y} = T$$

$$\left\{ \begin{array}{l} X = \begin{bmatrix} h \\ hv_x \\ hv_y \\ hC_r \\ z_{\text{bot}} \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} hv_x \\ hv_x^2 \\ hv_x v_y \\ hv_x C_r \\ 0 \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} hv_y \\ hv_x v_y \\ hv_y^2 \\ hv C_r \\ 0 \end{bmatrix}, S = \begin{bmatrix} E-D \\ 1-p \\ S_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, T = \begin{bmatrix} E-D \\ 1-p \\ T_3 \\ E-D \\ -\frac{E-D}{1-p} \end{bmatrix}$$

$$E = \alpha \omega_{s0} (1 - \alpha c_1)^m c_e$$

$$D = \alpha \omega_{s0} (1 - \alpha c_1)^m c_1$$



二相流流体模型

$$\tau_y = \alpha_1 e^{\beta_1 C_r}$$
$$\mu = \alpha_2 e^{\beta_2 C_r}$$

失稳判别

设置初始尾砂流密度，
浓度，流变参数

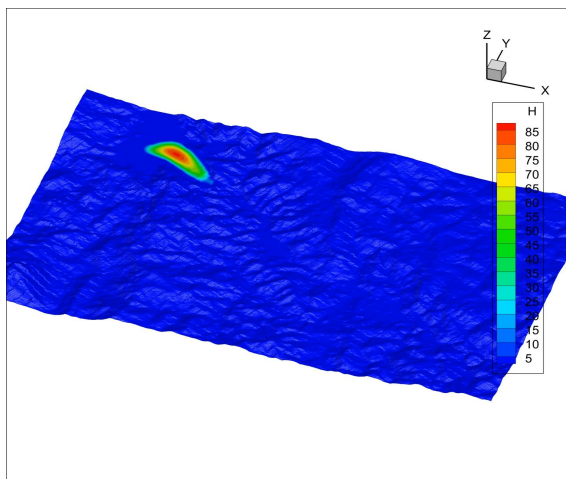
尾砂流流动，沉积项和
侵蚀项交换（尾砂流浓
度变化）更新流变参数

停止判别

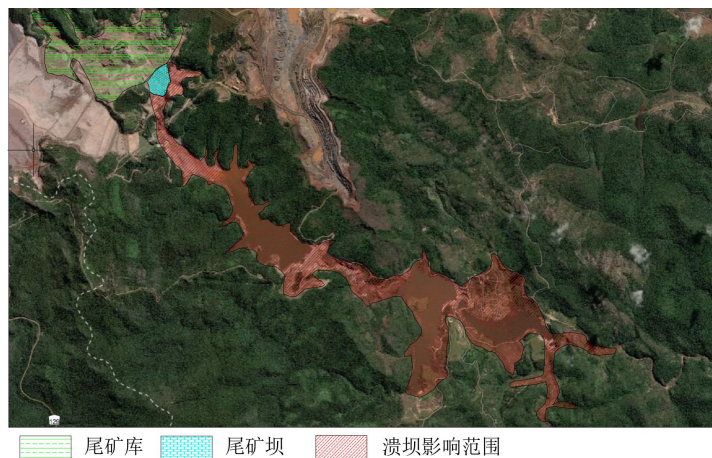
3. 尾矿库溃坝数值模拟研究

3.4、2015年巴西溃坝事故演进过程分析

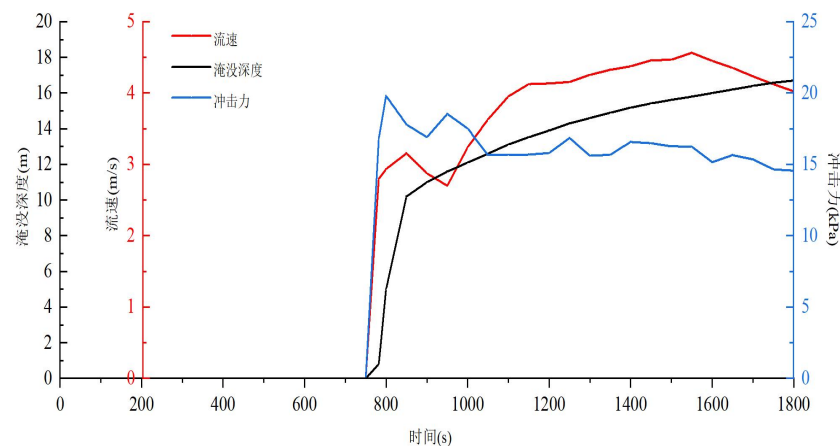
- ❖ 基于流态转变本构模型，使用绘图软件结合DSM技术对巴西Fundão尾矿坝进行三维建模
- ❖ 根据溃坝前后的卫星影像尾矿坝区域减少体积设置垮塌区域，最终得到的尾砂流堆积范围与卫星影像一致，说明了提出的相态转换模型可靠性。



巴西尾矿库溃坝动画



巴西尾矿库溃坝影响范围卫星云图

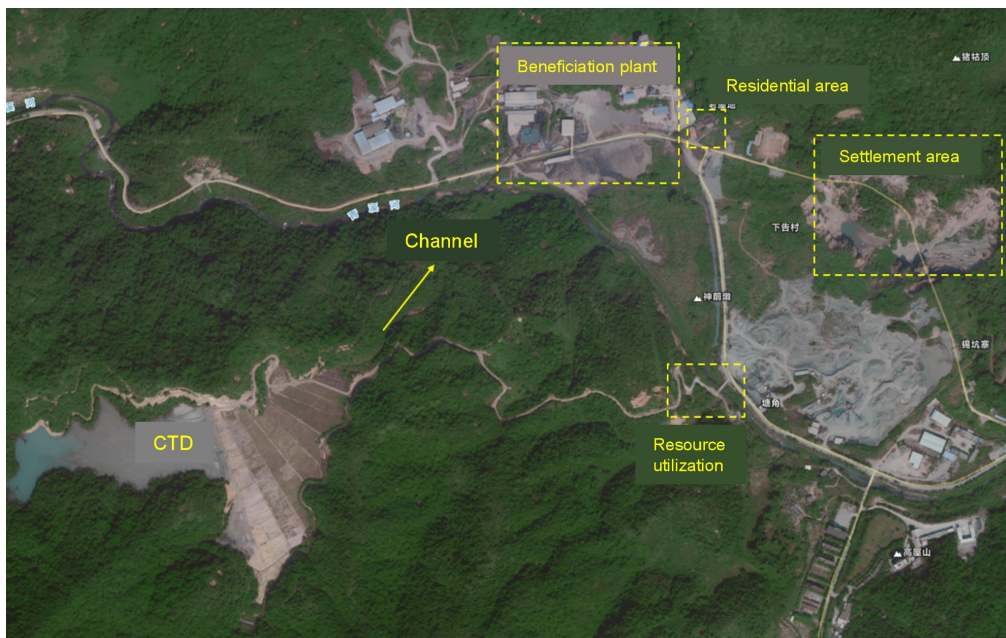


溃坝尾砂流在居民点海拔最低点的淹没深度、流速、冲击力随时间变化的曲线

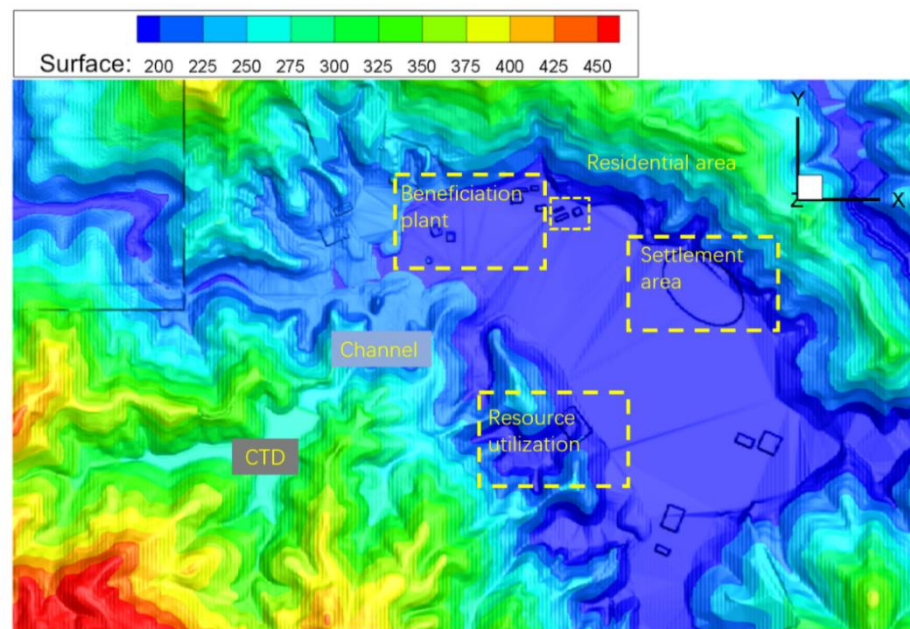
3. 尾矿库溃坝数值模拟研究

3.5、三维分析模型建立

- ❖ 使用卫星云图与CAD地图获取要建立的尾矿库模型与下游地形的三维数据，使用**Arcgis**进行**建模预处理**
- ❖ 利用Massflow进行模拟运算，并通过Tecplot后处理工具对仿真结果进行**图形化数字分析**



某尾矿库周边地形图

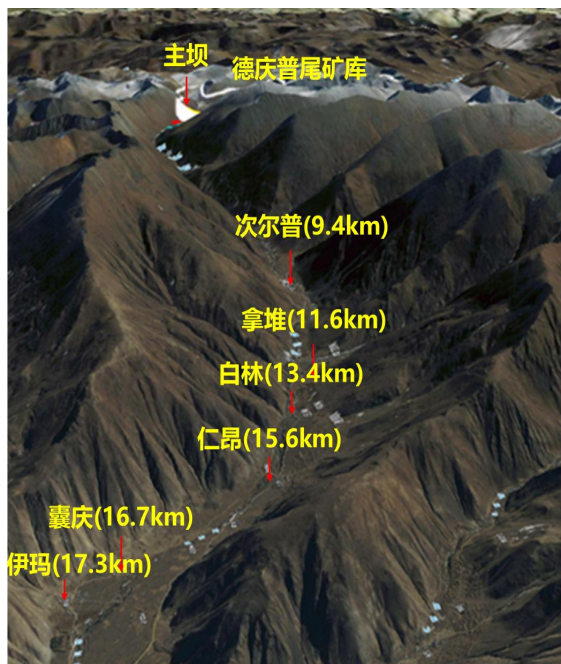


某尾矿库周边地形数值图

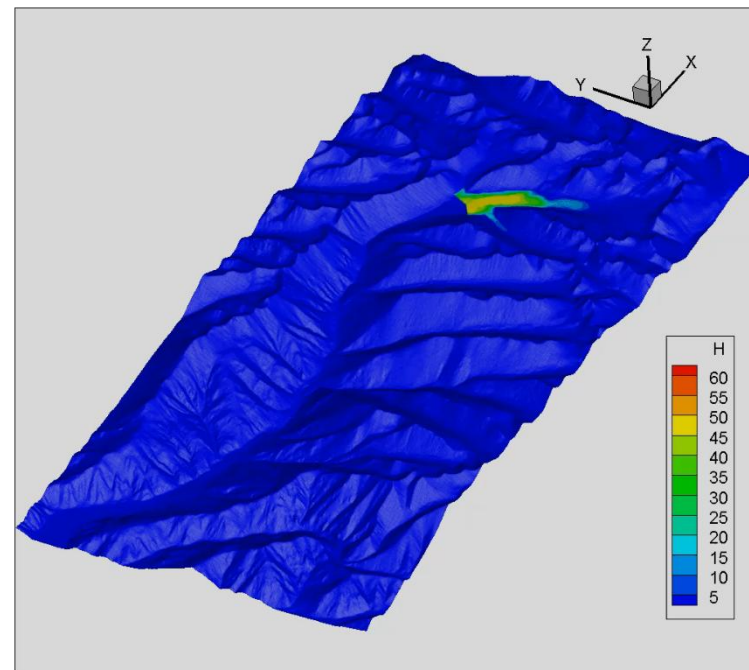
3. 尾矿库溃坝数值模拟研究

3.6、分析区域与工况

- ❖ 根据模拟结果设置模拟区域，开展不同工况的瞬时溃坝分析
- ❖ 可以对比不同工况的溃坝尾砂流运动与堆积特性，设置不同分析剖面进行数据分析



某尾矿库分析区域

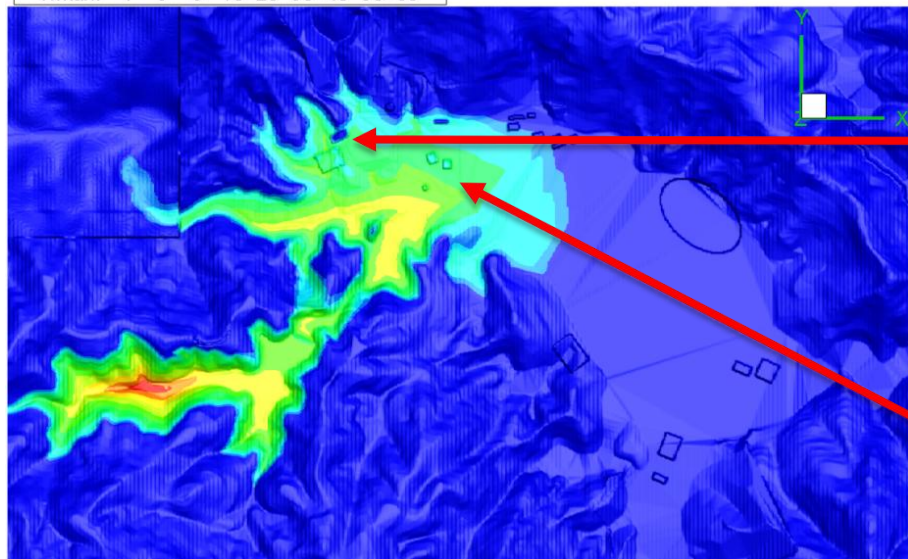
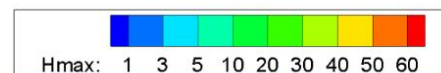


尾矿库溃坝模拟分析

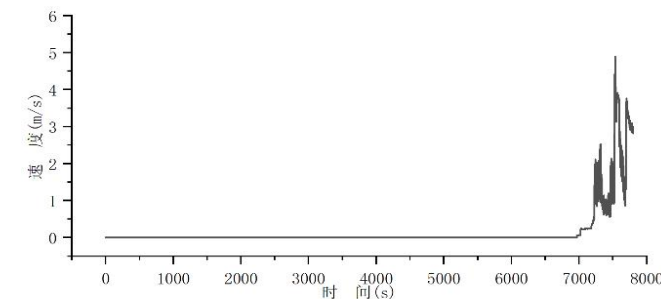
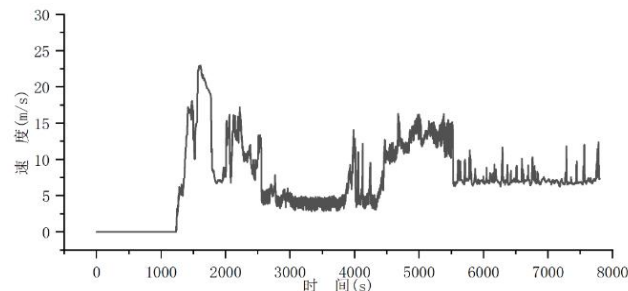
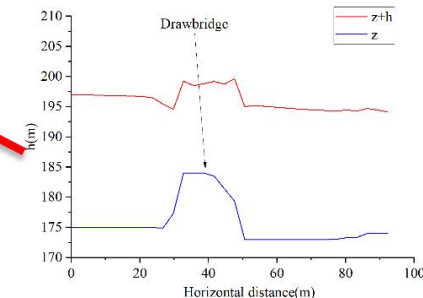
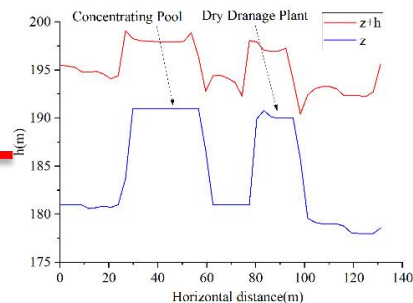
3. 尾矿库溃坝数值模拟研究

3.7、淹没深度与速度演化规律

- ❖ 通过Tecplot后处理工具对仿真结果进行图形化数字分析，可得到溃坝后下游最大流深分布图，同时可以得到不同剖面的淹没深度曲线
- ❖ 可以选取重要的居民点位置设置剖面得到速度随时间的变化曲线



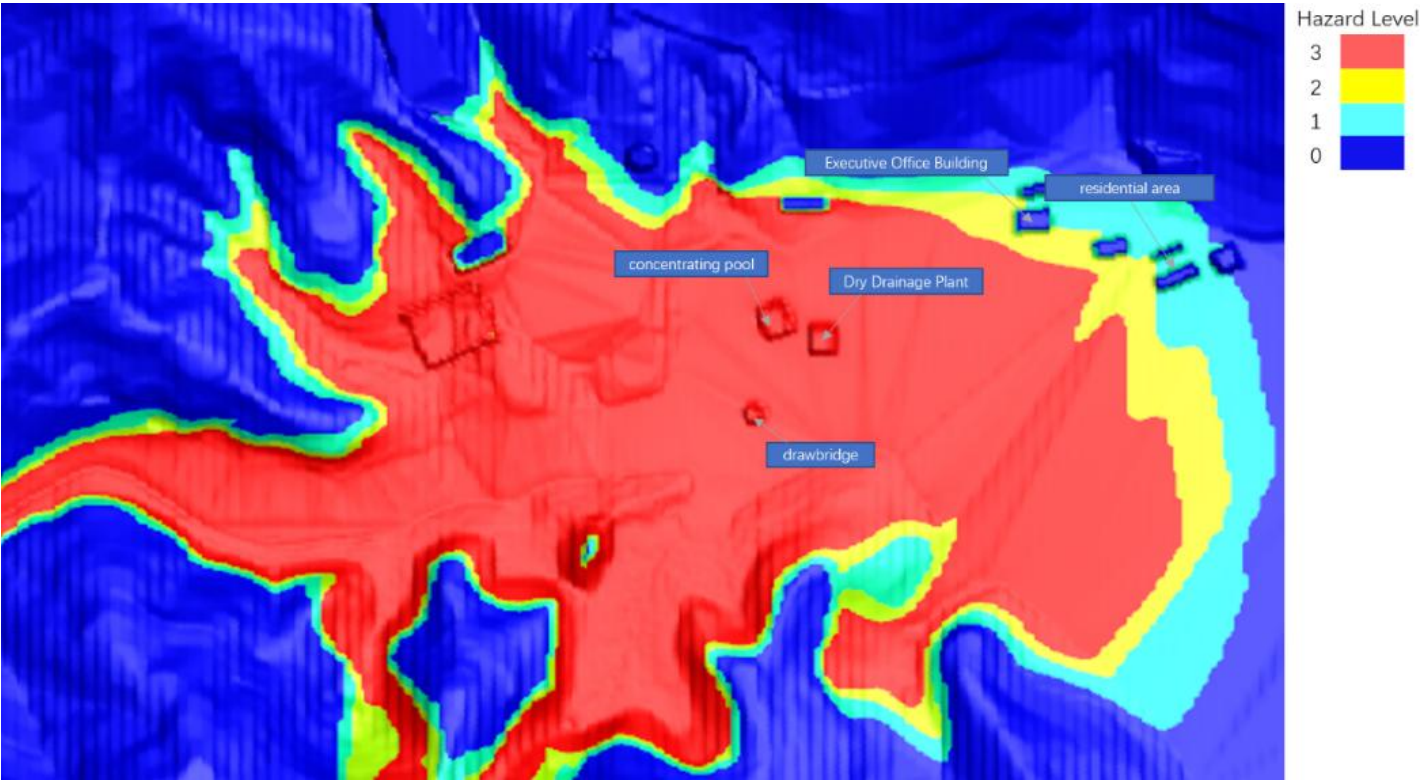
最大淹没深度与流速数据截取



3. 尾矿库溃坝数值模拟研究

3.8、灾害程度风险等级划分

- ❖ 考虑**设施重要程度**、**最大埋深**和**流量强度**等，提出了尾矿库溃坝风险分类标准及**风险划分等级**
- ❖ 根据灾害分类表，分析尾砂流流动过程，可以得到**溃坝后灾害风险分类图**



溃坝后灾害风险分类图

危险程度	风险等级	最大流深 H (m)	逻辑关系	流量强度 V×H (m ² /s)，流速×流深	说明
高	3	H≥3	Or	vh≥3	出现人员伤亡，房屋被毁，设施损坏严重
中	2	1≤H<3	And	1≤vh<3	出现人员受伤，房屋受损，其他设施受损
低	1	0.2≤H<1	And	0.2≤vh<1	小概率出现人员受伤，房屋受损，其他设施受损
超低	0	H<0.2	Or	vh<0.2	安全区域

尾矿库风险分类标准

汇报提纲



研究背景



尾矿库溃坝物理模型实验研究



尾矿库溃坝数值模拟研究



工程案例



总结



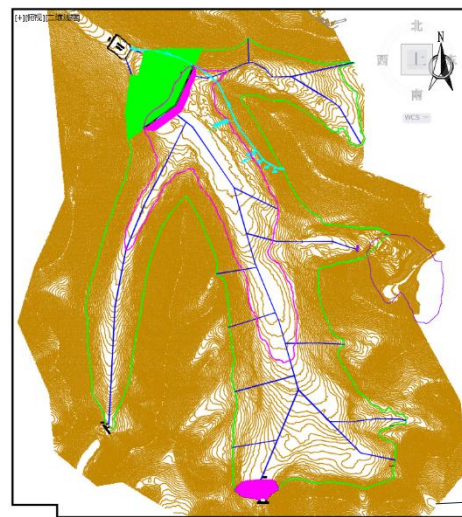
工程案例

4.1、地质资料收集

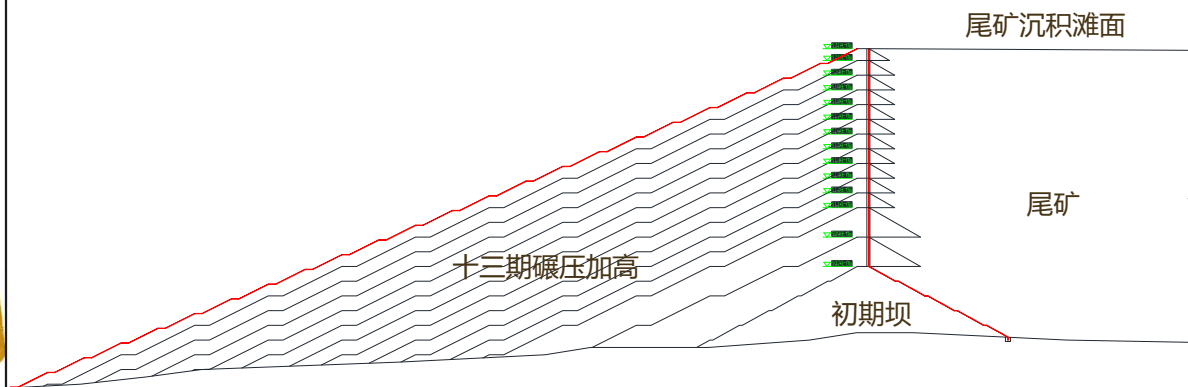
- ❖ 西藏某尾矿库地处拉萨市达孜区，拟定通过废石中线法分期加高至**5213m**高程，最终总坝高**195m**，总库容达 **$100253.9 \times 10^4 \text{ m}^3$** ，有效库容 **$85215.82 \times 10^4 \text{ m}^3$** ，根据设计规范判定为**一等库**，场区地震动峰值加速度值为**0.15g**，地震基本烈度为**Ⅷ度区**。



地理位置



平面布置图

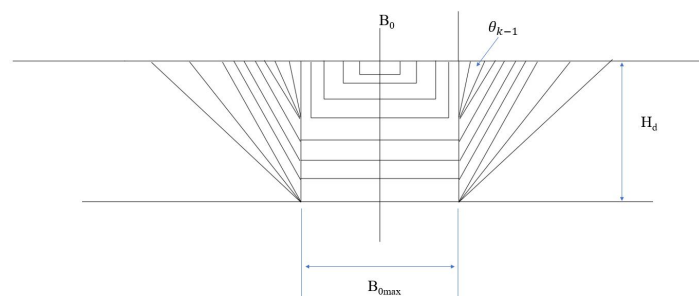


尾矿坝剖面图

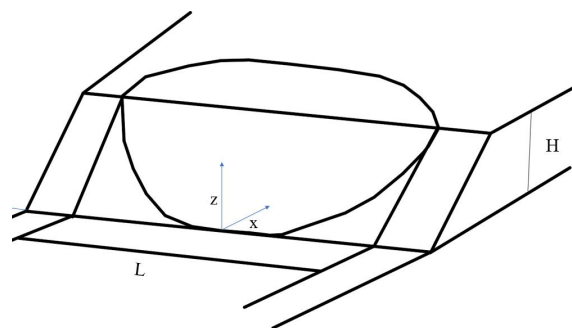
4. 工程案例

4.2、溃口分析

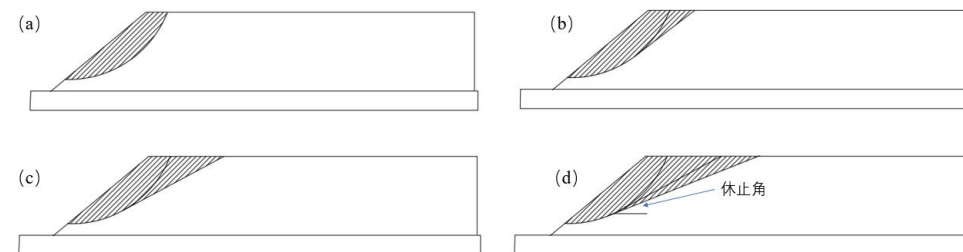
- ❖ 根据室内物理模型试验与反演分析确定尾砂流的**流变参数取值**
- ❖ 根据不同工况的溃口发展规律与设计工况选择合适的溃口形态（**梯形溃口，中间圆柱+两端球体滑动面，中间圆柱+两端球体滑动面（考虑二次垮塌）**）



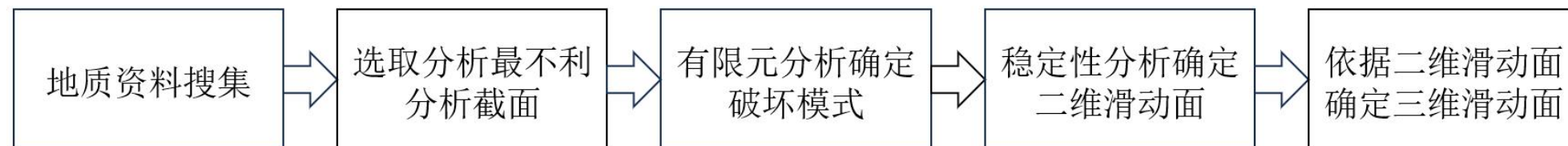
洪水漫顶工况（梯形溃口）



地震工况（不考虑物源区二次垮塌）



地震工况（考虑物源区二次垮塌）

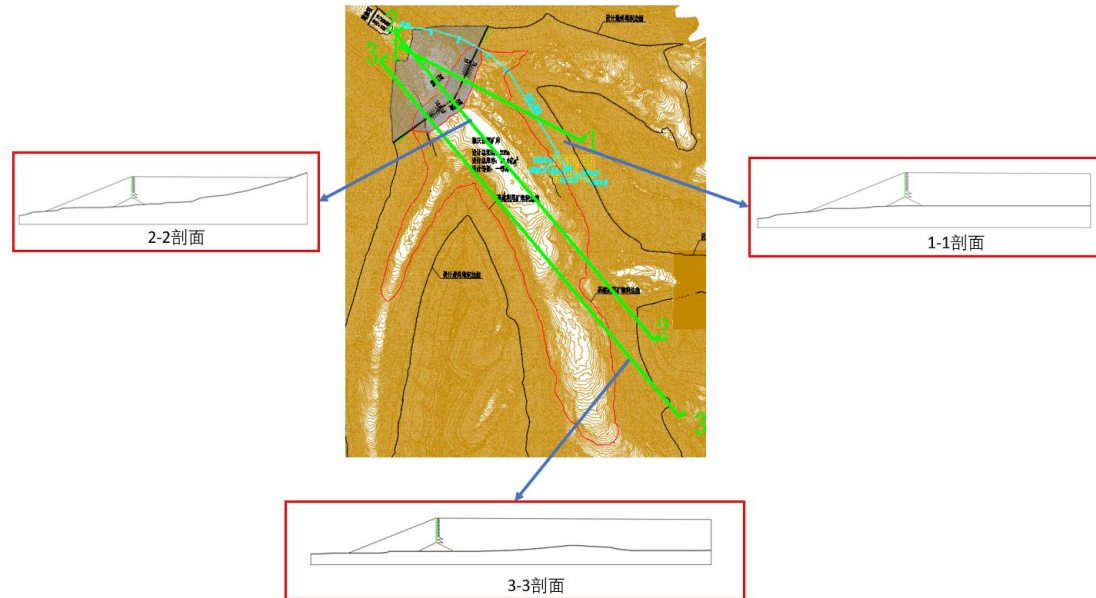


溃口分析流程图

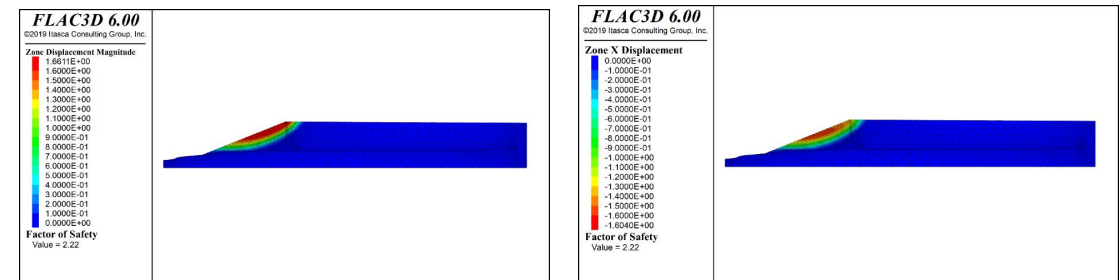
4. 工程案例

4.3、破坏模式分析

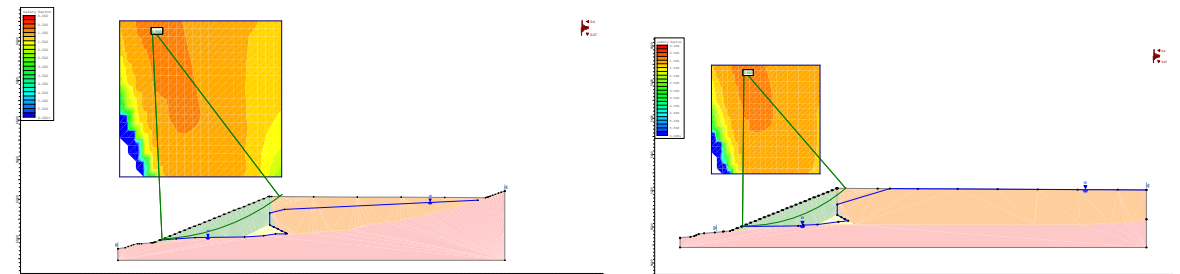
- ❖ 基于场地地形和尾矿库初步设计方案，选择2-3个剖面进行尾矿坝的**稳定性分析**
- ❖ 结合剖面图及材料参数取值建立尾矿坝的**有限差分法分析模型**，计算得到尾矿坝的**破坏模式**，依据破坏模式进行**尾矿坝稳定分析**



稳定性分析剖面选取



有限差分法有限元模型

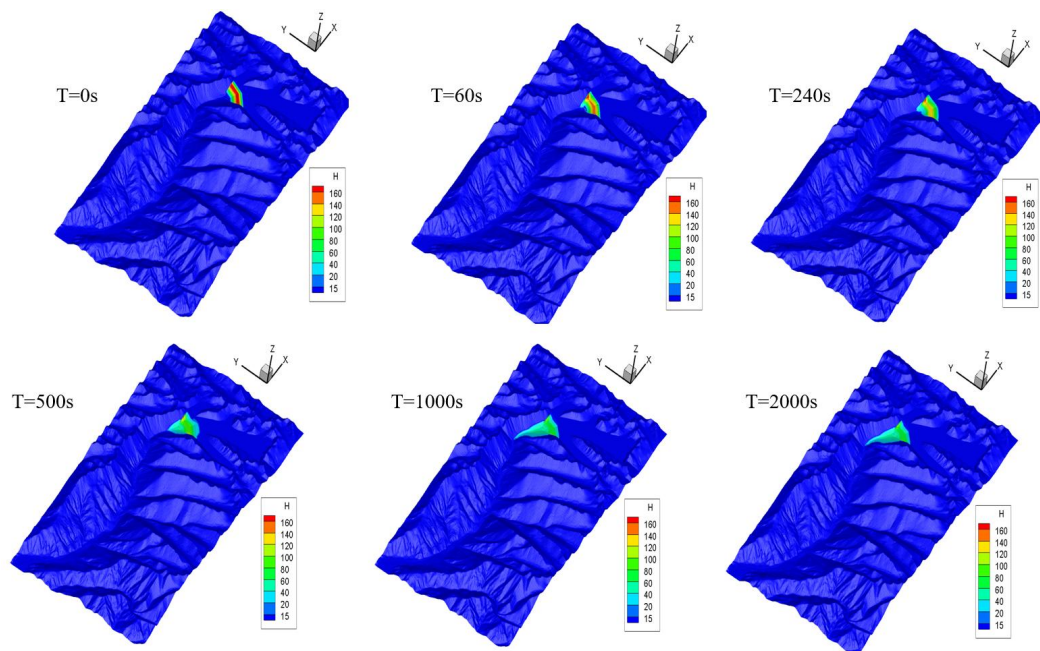


二维滑动面稳定分析结果

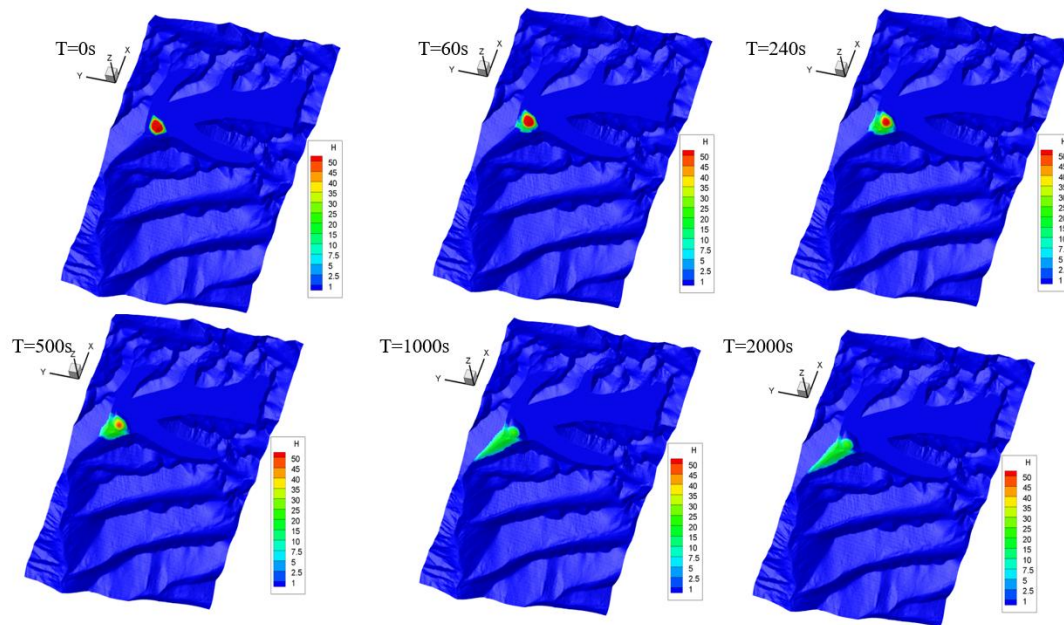
4. 工程案例

4.4、地震工况尾矿坝失稳影响区域分析

- ❖ 地震工况当尾矿坝干滩长度与库内水位线高度，浸润线高度均超过规范要求1.3倍以上，可以不考虑库内尾矿二次垮塌
- ❖ 不考虑二次垮塌工况下，溃坝距离较考虑物源区二次失稳工况减少了1452m



中间圆柱+两端球体滑动面影响区域分析（考虑二次垮塌）

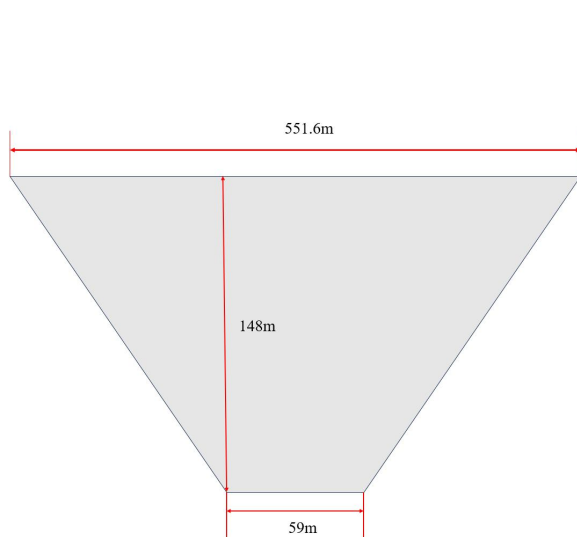


中间圆柱+两端球体滑动面影响区域分析（未考虑二次垮塌）

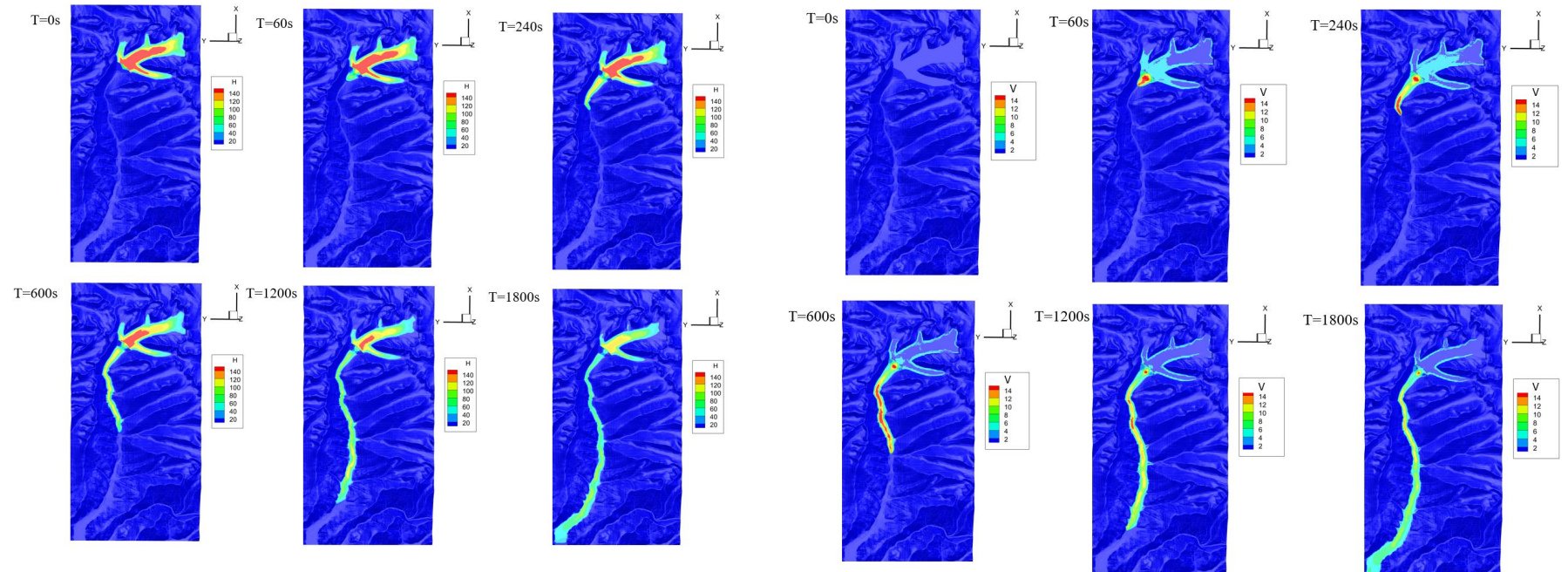
4. 工程案例

4.5、洪水漫顶工况稳定性影响区域分析

- ❖ 依据溃口经验公式与稳定性分析结果设置尾矿坝洪水漫顶工况形成**梯形溃口**的尺寸
- ❖ 建立合适的数值模型，**选取宾汉姆塑性本构模型**进行洪水漫顶工况下的影响区域分析



梯形溃口



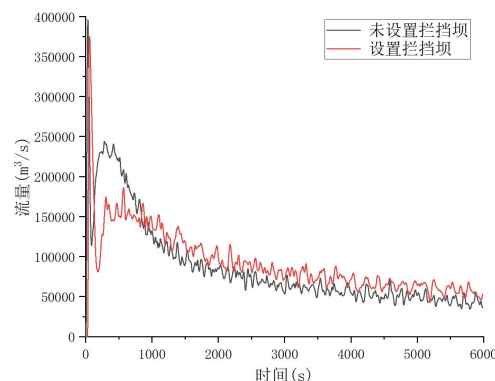
梯形溃口淹没深度云图

梯形溃口速度云图

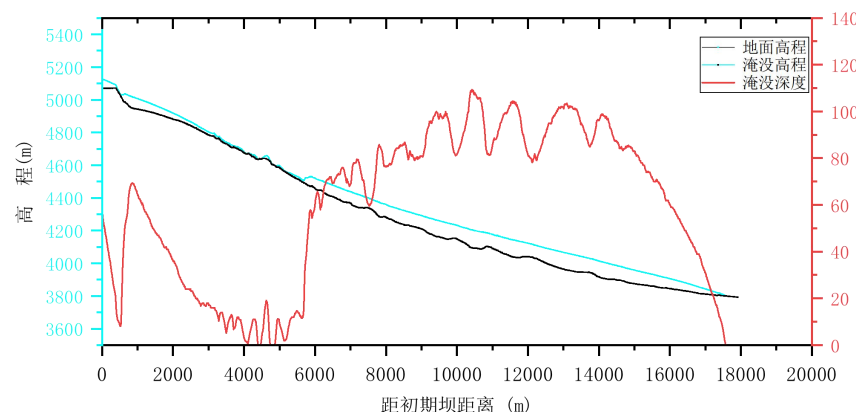
4. 工程案例

4.6、洪水漫顶工况（设置拦挡坝）失稳区域分析

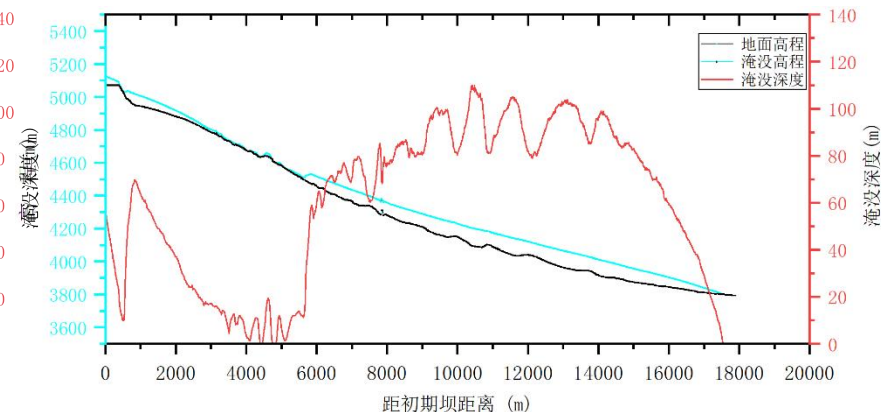
- ❖ 距离尾矿坝约7.8km处设置30m高拦挡坝，尾砂流到达各居民点用时**延后13-18s**，各居民点淹没深度与无拦挡坝工况**基本相同**，靠近拦挡坝的次尔普峰值流速降低，其他居民点峰值流速**不变**



流量对比效果



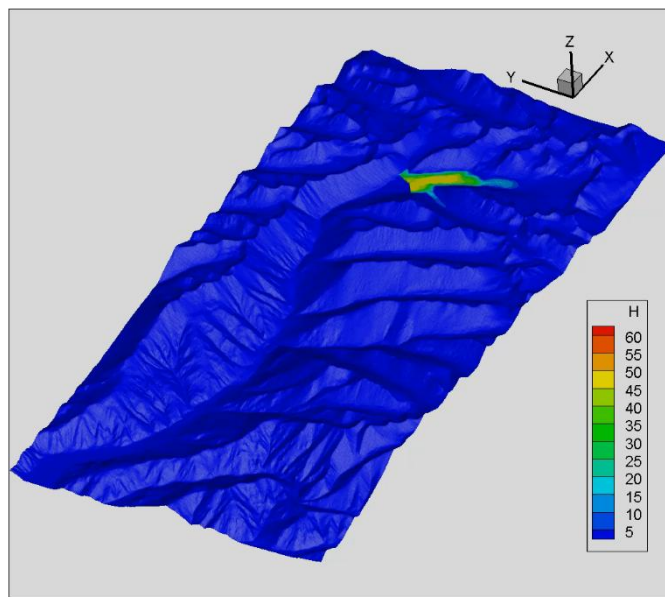
最终淹没深度对比效果



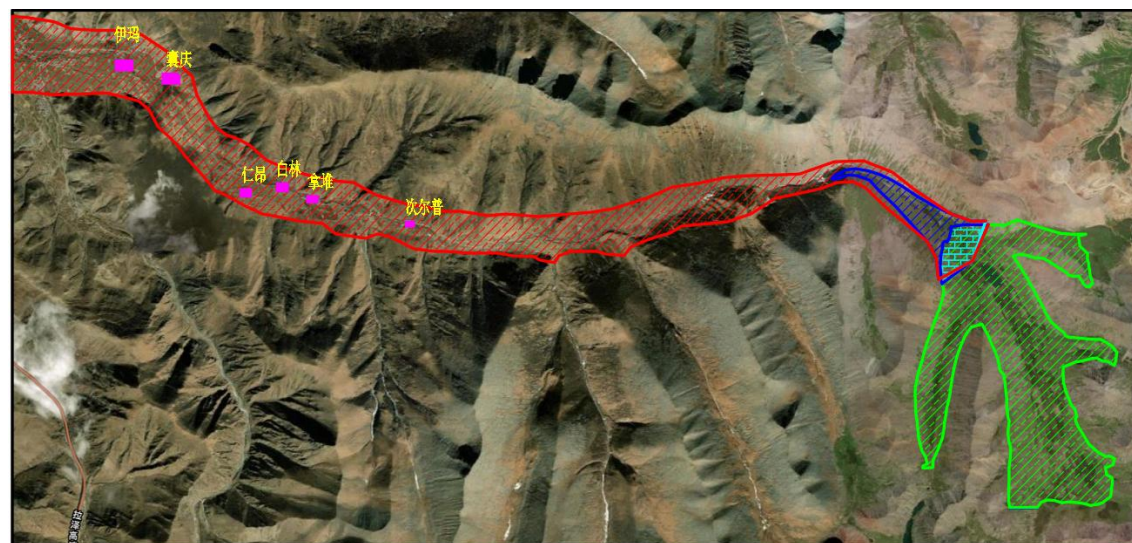
4. 工程案例

4.7、地震工况与洪水漫顶工况失稳区域对比分析

- ❖ 依据数值模拟结果与隐患识别技术，对不同工况的失稳区域进行对比分析，根据不同致灾因子进行**差异预警**，实现**安全预警的准确性与高效性**。
- ❖ 已开展了多座尾矿库溃坝数值模拟分析，为**尾矿库安设提供支撑**



隐患识别技术



地震工况与洪水漫顶工况影响区域对比分析图

汇报提纲



研究背景



尾矿库溃坝物理模型实验研究



尾矿库溃坝数值模拟研究



工程案例



总结



5. 总结

- ❖ 1、开展了尾矿坝溃坝物理模型实验研究，总结了尾矿坝溃口发展形态，提出了溃坝尾砂流流速、流量预测模型
- ❖ 2、引入基于浓度相关的宾汉姆塑性本构模型与二相流基本理论，构建了洪水漫顶工况下尾砂流的动力学模拟框架，基于这一模拟框架，使用绘图软件结合DSM技术对巴西Fundão尾矿坝进行三维建模，对2015年巴西尾矿坝溃坝事故进行了复现，验证了该模拟框架在真实复杂地形条件下的适用性。
- ❖ 3、开展了尾矿坝溃坝数值模拟分析，明确了工程应用中流滑参数取值方法，得到了溃坝后下游最大流深分布、淹没深度曲线和速度随时间的变化曲线，提出了尾矿库风险分类标准及风险划分等级
- ❖ 4、依据西藏某尾矿坝工程案例，分析了多工况下不同溃口形态的尾矿坝尾砂流特征对比分析，提出了基于隐患识别技术与尾矿坝数值模拟的差异化防控方法

汇报完毕，谢谢！

联系方式：15802789036