

高混凝土坝非线性动力并行计算

【获奖等级】 理论成果奖二等奖

【任务来源】 国家科技计划项目、其他项目

【起止时间】 2004 年 1 月~2020 年 12 月

【完成单位】 中国水利水电科学研究院

【主要完成人】 马怀发、陈厚群、许文祥、吴建平、张立红、吕 玮、
刘国庆、曾新翔、朱洪东、何建涛、常廷改、许亮华

一、研究背景

目前我国已建、在建和拟建的许多高混凝土大坝处于高烈度地震区，强震作用可能使坝体或地基产生强非线性变形乃至失稳破坏，而国内外尚没有如此大规模高坝经历强震的实例，因此迫切需要计算机数值模拟来分析和预测灾变过程。

强震作用下高坝系统失稳破坏过程的数值模拟，需要解决坝体~库水动力相互作用、坝基远域能量逸散效应、坝体伸缩缝和地基夹层的接触非线性、以及坝体和地基非线性等问题。因此，建立更能贴近复杂地基地形、地质条件，综合反映坝体接触非线性、材料非线性的数值模型，提出高效稳定的计算方法，构建完善的混凝土高坝系统地震动非线性响应高性能并行计算分析系统，实现强地震作用下混凝土高坝系统灾变演化全过程大规模多尺度的数值模拟具有重要的研究意义。

二、主要内容

- 1、大坝混凝土材料的动态损伤机理及其细观数值分析研究。
- 2、混凝土坝接触非线性及材料非线性问题的求解方法研究。
- 3、无限地基人工边界及地震动输入方法研究。
- 4、高混凝土坝静动力并行计算系统的算法研究及程序开发。
- 5、混凝土坝抗震安全评价指标及方法研究。

三、创新点

1、为了揭示混凝土动态损伤机理，提出了通过拓扑变形生成星形固体增强颗粒复合材料细观模型及其界面控制方法，并基于球体等效凸扩展方法，提出了快速“剔除~占位”算法，可以快速高效地生成全级配混凝土复杂多面体骨料并实现复杂骨料的随机密实堆积。

2、针对接触非线性问题，提出了一种便于并行计算的带有预分区的面面接触算法以解决接触面大滑动位移问题，同时提出了一种存储量小、易于并行化的分步接触算法，用以提高接触问题的求解效率；提出了一种混凝土类材料弹塑性损伤问题的全隐式迭代法，可以更全面地描述混凝土类材料的非线性变形特征。

3、建立了粘弹性人工边界的虚位移原理，提出了半无限大饱和地基动力固结问题的对称分裂算子法和人工粘弹性边界(VSB)动力固结问题的虚位移原理，为水库诱发地震的动力计算、库区高边坡的动力稳定分析等提供了有效的人工边界模拟方法。

4、提出了一般稀疏线性方程组的因子组合型并行预条件和区域分解型并行预条件的一种粗网格校正算法，并开发了具有自

主知识产权的通用并行预条件子空间迭代软件包 (GPPS)，为实现高混凝土坝大规模数值模拟提供了有效的技术手段。

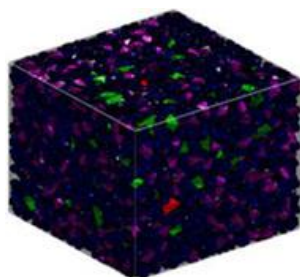
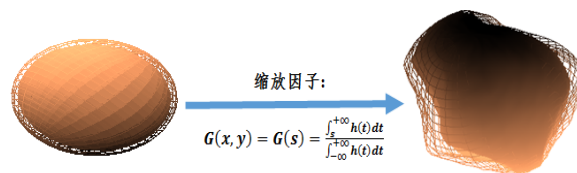


图 1 全级配混凝土随机骨料模型(骨料含量 70.7%)



$$P(\mu, \nu, r) = P_d(\mu, \nu) - r \frac{P_d(\mu, \nu) - C}{\|P_d(\mu, \nu) - C\|} \begin{cases} \Omega_i: 0 \leq r \leq \gamma_0, 0 \leq \mu \leq 2\pi, 0 \leq \nu \leq \pi. \\ \Omega_d: \gamma_0 \leq r \leq 1, 0 \leq \mu \leq 2\pi, 0 \leq \nu \leq \pi. \end{cases}$$

图 2 增强颗粒拓扑变形及界面厚度控制

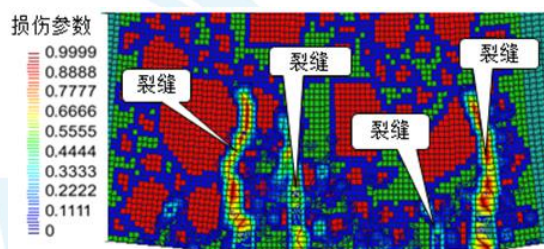
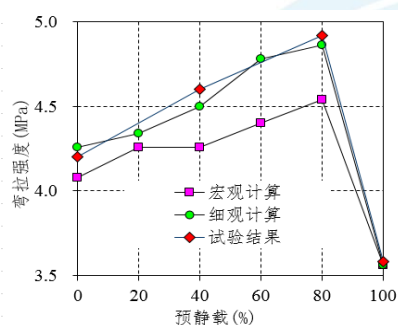
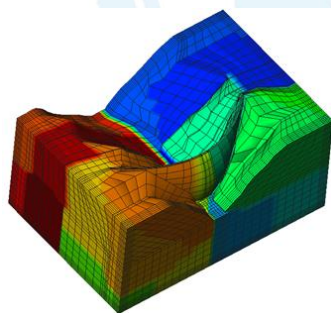
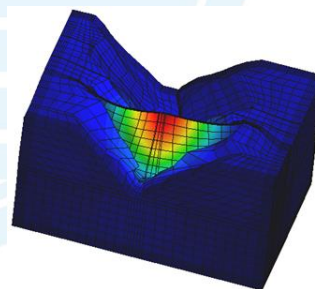


图 3 混凝土细观数值模拟



(a) 并行计算区域分解



(b) 地震响应分析

图 4 高拱坝地震响应的并行计算