

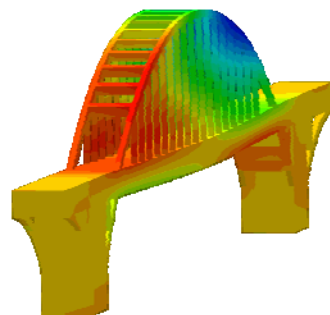
北京极道成然科技有限公司

GDEM力学分析系列软件介绍





GDEM力学分析系列软件



一种模拟工程地质灾害全过程的力学分析方法！

一种基于GPU并行技术的高效率力学分析软件！

➤GDEM简介

10多年来，中国科学院力学研究所始终致力于地质灾害成灾机理的数值模拟研究，并提出了基于连续介质力学的离散元方法(Continuum-based Discrete Element Method)。该方法将有限元与离散元进行耦合，在块体内部进行有限元计算，在块体边界进行离散元计算，通过块体内部及块体边界的断裂，不仅可以模拟材料在连续状态下及非连续状态下的变形、运动特性，更可以实现材料由连续体到非连续体的渐进破坏过程。

GPU是图形处理器的简称，是计算机显卡的核心部件，是天然的高性能并行设备。北京极道成然科技有限公司以CDEM方法为基础，结合GPU技术，与中国科学院力学研究所联合开发出了具有独立知识产权的商用软件GDEM，将计算速度提升了两个数量级，将计算规模提升了一个数量级。

➤GDEM的应用领域

岩土工程、采矿工程、隧道工程、水利工程、地质工程、结构工程中，材料的渐进破坏模拟及整体稳定性评价。

➤GDEM的运算效率

GPU型号	计算规模 (千万自由度)	计算速度 (秒/万单元/万迭代步)	GPU市场价格 (万元)
GTX 285	1.0	8~10 (连续问题单精度) 16~20 (连续问题双精度) 30~40 (非连续问题单精度) 60~80 (非连续问题双精度)	约0.2
GTX 480/580	1.8	4~5 (连续问题单精度) 8~10 (连续问题双精度) 15~20 (非连续问题单精度) 30~40 (非连续问题双精度)	约0.4
Tesla C1060	5.0	同GTX 285	1.0~1.5
Tesla C2050	3.6	同GTX 480/580	1.5~2.0
Tesla C2070	7.2	同GTX 480/580	>2.0

注：计算机的其他配置采用普通配置即可，约1万元即可完成GPU计算平台的搭建！

➤GDEM的版本类型

工程版		模型 / 功能	GPU平台架构模式
静力学	基础版	弹性、塑性、蠕变、裂纹模型	单机模式
	专业版	静力学基础版功能 + 断裂模型	服务器 - 客户端形式
动力学	弹性版	弹性模型 + 动力学基础包 (波场分析)	单机形式
	基础版	静力学专业版功能 + 动力学基础包	
	专业版	动力学基础版功能 + 散体流动模型	

注：教学版的功能与上述工程版的功能完全一致，仅对计算网格数量做了限制！

诚邀国内的单位或个人加盟开发各领域的专业软件。

公司将开放相关源代码，研发成果共享，以加盟方为主！

北京极道成然科技有限公司

地址：北京市海淀区上地10街辉煌国际1号楼1010室

邮编：100085

固定电话：010-59704529

移动电话：18911254529

电子邮箱：info@gdem-tech.com 网址：http://www.gdem-tech.com/

自主知识产权的力学分析软件！

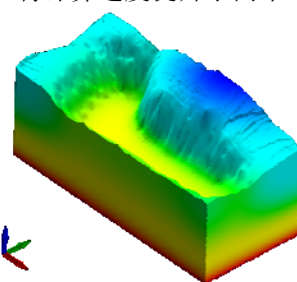
千万自由度的快速计算！

从连续到非连续的精确模拟！

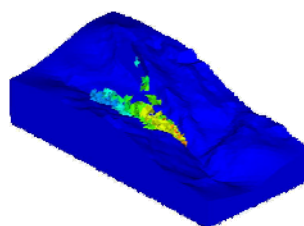
GDEM——让数值计算插上翅膀！



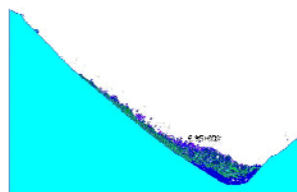
地应力场计算(127万四面体)
8 min完成弹性场计算



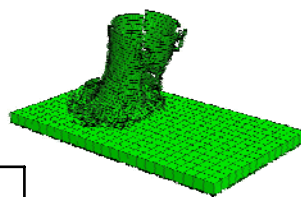
自然边坡(51万六面体)
4 min完成弹性场计算



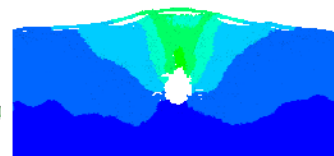
鸡尾山滑坡全过程模拟



唐家山滑坡全过程模拟



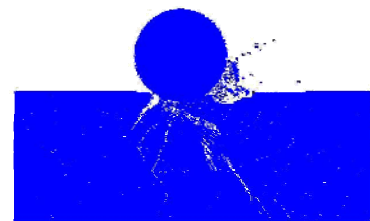
冷却塔爆破拆除模拟



碎裂岩体中的爆炸模拟



子弹冲击厚混凝土板



刀片切割混凝土块

目 录

一、公司简介	1
二、GDEM 的特点.....	2
三、GDEM 的应用领域.....	3
四、GDEM 的基本原理.....	4
五、GDEM 的基本模型.....	7
六、GDEM 的 GPU 并行化架构.....	9
七、GDEM 中 GPU 的加速效果.....	11
八、GDEM 在各领域中的应用实例.....	15

一、公司简介

北京极道成然科技有限公司成立于 2010 年，是一家以研发、销售工程计算领域的高效并行数值模拟软件，提供高性能计算全面解决方案的高科技新兴企业。公司现有员工 12 人，其中博士 4 人，硕士 8 人，均具有数值编程、并行处理及计算平台搭建方面的丰富经验。

公司与中国科学院力学研究所联合开发的 GDEM 力学分析系列软件，以基于连续介质力学的离散元方法（CDEM）为基础，以高性能图形处理器（GPU）为依托，将计算速度提升了两个数量级，将计算规模提升了一个数量级。该软件可广泛应用于岩土、采矿、隧道、油气、水利、地质、结构等多个领域的材料渐进破坏模拟及整体稳定性评价。该软件已经在国内多家科研机构及高校成功应用，并取得了良好的计算效果。

公司全体员工将本着“引领计算技术，合作创造未来”的宗旨，通过与国内外科研机构的密切合作，真正实现工程数值计算的高效性、快捷性，为快速分析各类工程问题提供有效的解决途径。

二、GDEM 的特点

数值计算方法主要包括两类：一类以连续介质力学为基础，模拟材料的连续变形及塑性破坏，主要包括有限元及有限差分等两种方法。另一类以非连续介质力学为基础，用于模拟散体系统的运动、碰撞特性，主要包括块体离散元及颗粒离散元等两种。

有限元法及有限差分法能够较好地模拟材料在连续状态下的特性，但不能模拟材料从连续到非连续的过程及在非连续状态下的运动特性。块体离散元及颗粒离散元在模拟非连续体的运动特性方面具有一定的优势，但较难模拟材料的连续变形过程。

基于连续介质力学的离散元方法（**Continuum-based Discrete Element Method**）是中国科学院力学研究所提出的适用于模拟材料在静、动载荷作用下非连续变形及渐进破坏的一种数值算法。该方法将有限元与离散元进行耦合，在块体内部进行有限元计算，在块体边界进行离散元计算，不仅可以模拟材料在连续状态下及非连续状态下的变形、运动特性，更可以实现材料由连续体到非连续体的渐进破坏过程。CDEM 方法中包括弹性模型、塑性模型、断裂模型、蠕变模型等多种模型，已经在岩土工程、采矿工程、结构工程及水利水电工程等多个领域广泛应用。

GPU 是图形处理器的简称，是计算机显卡的核心部件，是天然的高性能并行处理器。GPU 往往用于大型三维场景游戏的实时显示，介于 GPU 的高效率并行机制，目前科研界已经开始将 GPU 技术应用于工程计算领域。

北京极道成然科技有限公司以中科院力学所的 CDEM 为基础，开发出了基于 GPU 技术的商用软件 GDEM，大大提升了计算速度及计算容量。以 GPU 中档配置（NVIDIA GeForce 285）为例，可计算百万量级的四面体单元，且每一万个单元计算一万个时间步的耗时仅为 14-17 秒。

三、GDEM 的应用领域

1、岩土工程

(1) 降雨、地震作用下, 公路边坡、铁路边坡、基坑边坡、自然边坡的稳定性分析、支挡结构的优化设计及成灾规模的模拟;

(2) 公路、铁路、地铁隧道的优化设计, 支护方案的优选, 顶板冒落、两帮垮塌、底板鼓胀、突水突泥等突发灾害的力学分析及超前预测分析;

(3) 爆破开采隧道或爆破削减边坡坡脚过程中, 岩土体的破坏过程及爆破效果模拟;

(4) 复合地基 (CFG 桩地基等) 的承载力分析, 灌注桩、预制桩与岩土体相互作用的模拟分析。

2、结构工程

(1) 高层建筑在地震作用下的破坏状态及成灾规模模拟;

(2) 钢筋混凝土中应力波的传播及无损探伤的正演模拟;

(3) 冷却塔、烟囱、高层建筑的拆除爆破。

3、采矿工程

(1) 地下开采中, 竖井稳定性的模拟, 巷道稳定性分析及支挡结构的优化设计;

(2) 煤与瓦斯突出过程模拟并对煤层开采过程中的是否会发生突出事故进行力学分析及预测;

(3) 露天开采中, 露天矿边坡稳定性分析, 排土场边坡稳定性分析及爆破开采的爆破方案优化设计;

(4) 露天开采与地下开采相互影响的力学分析;

(5) 尾矿库的整体稳定性分析及发生失稳溃坝后的运动状态模拟;

(6) 隧道掘进机 (TBM)、割煤机或钻机的破岩能力及钻头受力、磨损分析。

4、水利水电工程

(1) 大、中、小型水库的整体稳定性分析, 在暴雨及库水位上涨的情况下, 水库坝体发生管涌、溃坝的概率分析及溃坝过程模拟;

(2) 水库两岸高陡岩质边坡的稳定性分析及成灾规模的分析。

四、GDEM 的基本原理

GDEM 采用基于时程的动态松弛技术进行显示迭代计算，求解动态问题、非线性问题及大位移、大转动问题具有明显优势，其计算流程如图 1 所示。

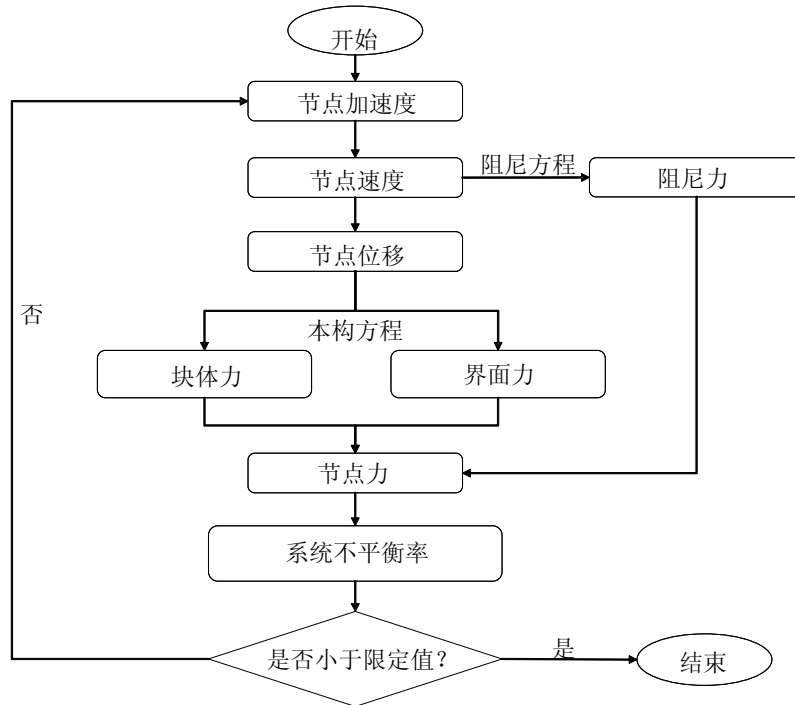


图 1 GDEM 方法的计算流程

GDEM 中的块体由一个或多个有限元单元组成，在块体内部使用连续本构，块体边界使用非连续本构（如图 2）。GDEM 中每个有限元单元可以是简单的四面体、五面体及六面体单元，也可以是复杂的多面体单元，复杂多面体单元（如图 3）。GDEM 中块体间的非连续变形主要通过弹簧来实现，通过弹簧的断裂来模拟材料的开裂、滑移等。

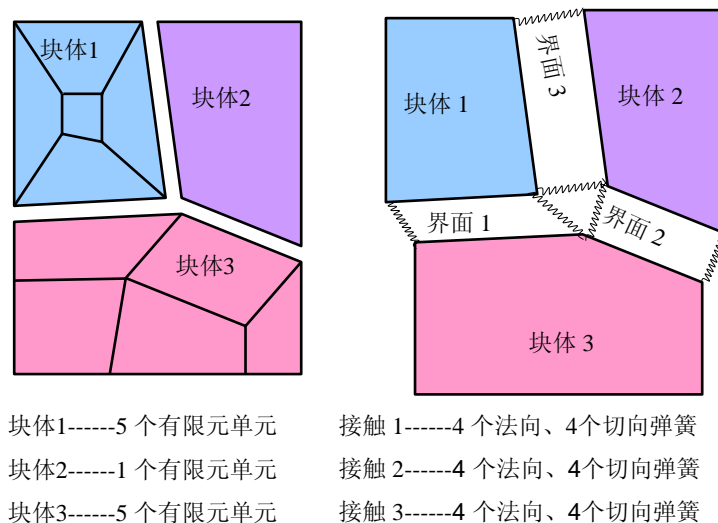
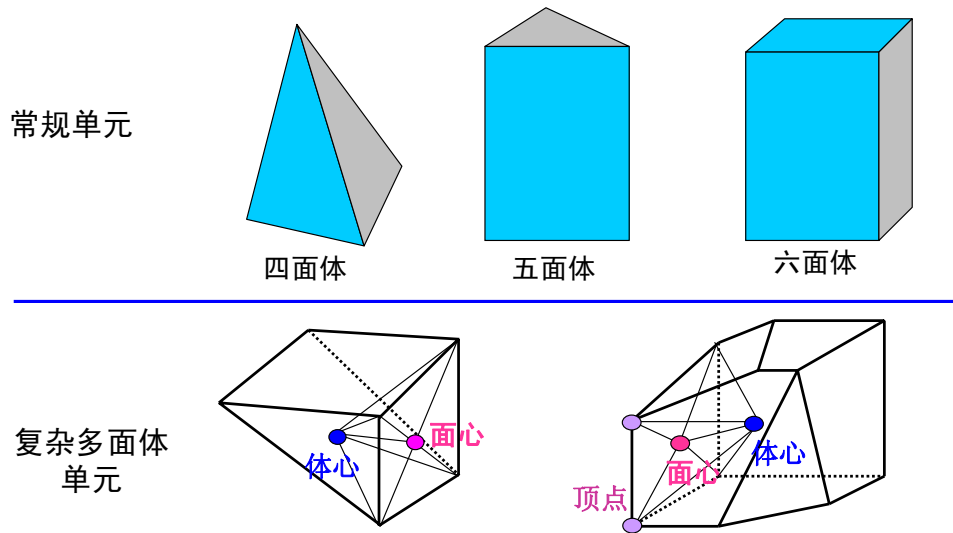


图 2 GDEM 中的块体及界面



离散为通过体心、面心的一系列四面体。
 8节点六面体，可以离散为24个四面体。

图 3 GDEM 中的有限元单元

GDEM 采用刚度矩阵法求解单元的内力。由于 GDEM 采用动态松弛技术，并不需要形成总体刚度矩阵，而只需求取每一个单元的单元刚度矩阵，在每个迭代步通过式 1 计算单元自身的节点力，并将此节点力分配至单元对应的节点上。其中 $\{F\}_i^e$ 为单元 i 的节点力向量， $\{u\}_i^e$ 为单元 i 的节点位移向量， $[K]_i^e$ 为单元 i 的单元刚度矩阵。

$$\{F\}_i^e = [K]_i^e \{u\}_i^e \quad \text{式 (1)}$$

GDEM 界面的法向及切向弹簧的示意图如图 4 所示，弹簧力的计算如式 2 所示。其中 F_n^j 、 F_s^j 表示第 j 根弹簧的法向及切向力， K_n^j 、 K_s^j 表示第 j 根弹簧的法向及切向刚度， Δd_n^j 及 Δd_s^j 表示第 j 根弹簧的法向及切向位移。

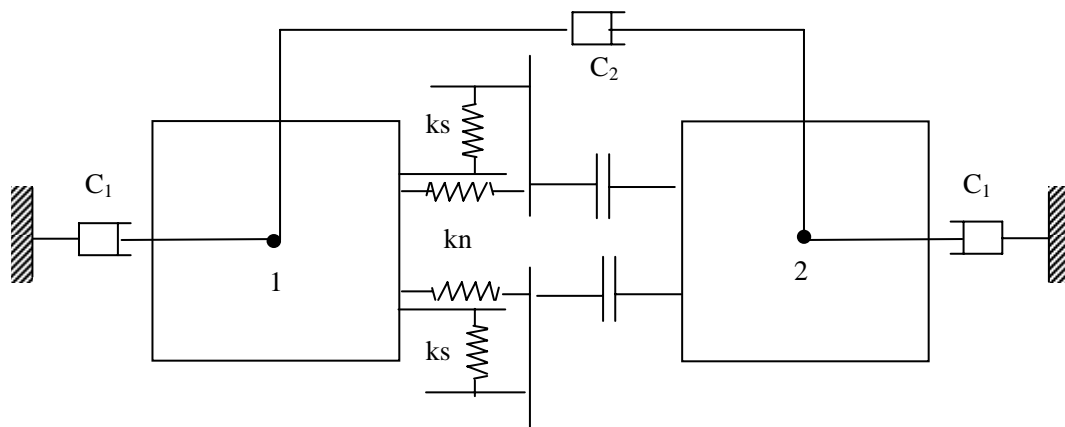


图 4 接触面法向、切向弹簧示意

$$\begin{cases} F_n^j = -K_n^j \times \Delta d_n^j \\ F_s^j = -K_s^j \times \Delta d_s^j \end{cases} \quad \text{式 (2)}$$

进行破坏计算时, 采用 Mohr-Coulomb 准则, 对式中的弹簧力进行修正, 如式 3, 其中 T 为抗拉强度, ϕ 为内摩擦角, C 为粘聚力。

$$\begin{cases} (1) \text{ If } -F_n^j \geq T \quad F_n^j = F_s^j = 0 \\ (2) \text{ If } F_s^j \geq F_n^j \times \tan(\phi) + C \\ F_s^j = F_n^j \times \tan(\phi) + C, C = 0 \end{cases} \quad \text{式 (3)}$$

五、GDEM 的基本模型

GDEM 中的数值模型分为块体模型、界面模型及工程结构模型等三类。

1、块体模型

块体模型主要包括：线弹性模型、Drucker-Prager 模型、Mohr-Coulomb 模型、块体切割模型、孔隙渗流模型、蠕变模型等 6 种。

(1) 线弹性模型

用于计算系统的弹性应力场、应变场及位移场。

(2) Drucker-Prager 模型

用于模拟材料的塑性破坏，包括拉伸破坏及剪切破坏两种形式。

(3) Mohr-Coulomb 模型

用于模拟材料的塑性破坏，包括拉伸破坏及剪切破坏两种形式。

(4) 块体切割模型

用于模拟连续体中显式裂纹的出现过程，脆性材料的裂纹扩展模拟以线弹性模型为基础；延性材料的裂纹扩展模拟以 Drucker-Prager 模型或者 Mohr-Coulomb 模型为基础，当模型出现局部化带后，进行块体切割，形成显式裂纹。

(5) 孔隙渗流模型

用于模拟孔隙介质中流体的运移过程，可以实现稳态流、非稳态流的计算，可以给出孔隙水压力的分布特征，浸润线的位置等，可以与固体力学模型进行耦合求解。

(6) 蠕变模型

采用改进的 Burger 与 Mohr-Coulomb 耦合模型，可以模拟材料的粘弹塑性计算，适合模拟高地应力下材料的渐进破坏。

2、界面模型

界面模型主要包括：线弹性模型、脆性断裂模型、应变软化断裂模型、裂隙渗流模型等 4 种。

(1) 线弹性模型

用于相邻块体间节点力的传递，相当于节点间的强约束条件。

(2) 脆性断裂模型

用于模拟连续材料（脆性）的开裂、破坏，用于模拟干节理的破坏。

(3) 应变软化断裂模型

用于模拟连续材料（延性）的开裂、破坏，用于模拟含软弱夹层节理的破坏。

（4）裂隙渗流模型

用于模拟节理层中的渗流过程，可以与固体力学模型进行耦合求解。

3、工程结构模型

工程结构模型主要包括：锚杆/锚索模型、钢筋模型、桩梁模型等四种。

（1）锚杆/锚索模型

用于模拟工程中的锚杆/锚索等，可以施加预应力，可以计算其从围岩中拔出、自身断裂等物理过程。

（2）钢筋模型

用于模拟钢筋混凝土结构中的钢筋。

（3）桩梁模型

用于模拟弯曲作用不可忽略的工程结构，如治理滑坡时采用的抗滑桩、高桩码头中采用的斜桩、建筑结构中的承重梁等。

六、GDEM 的 GPU 并行化架构

与传统的 CDEM 程序不同，GDEM 首先需要将程序中的核心代码并行化。为了解决并行计算中的访问冲突问题，传统 CDEM 中克隆节点的方法被抛弃，取而代之的是节点力组的方法。对传统的 CDEM 来说，每个单元计算完毕后的节点力需同时分配给与本单元本节点对应的其余克隆节点，这种方法在串行架构下是可行的，但在并行架构下就会出现访问冲突。与传统的 CDEM 计算流程不同，并行化的方法采用一套临时数据结构来存储各单元计算出来的节点力。当所有单元的节点力计算完毕后，将此临时数据结构中的节点力独立分配到各节点中。（如图 1）

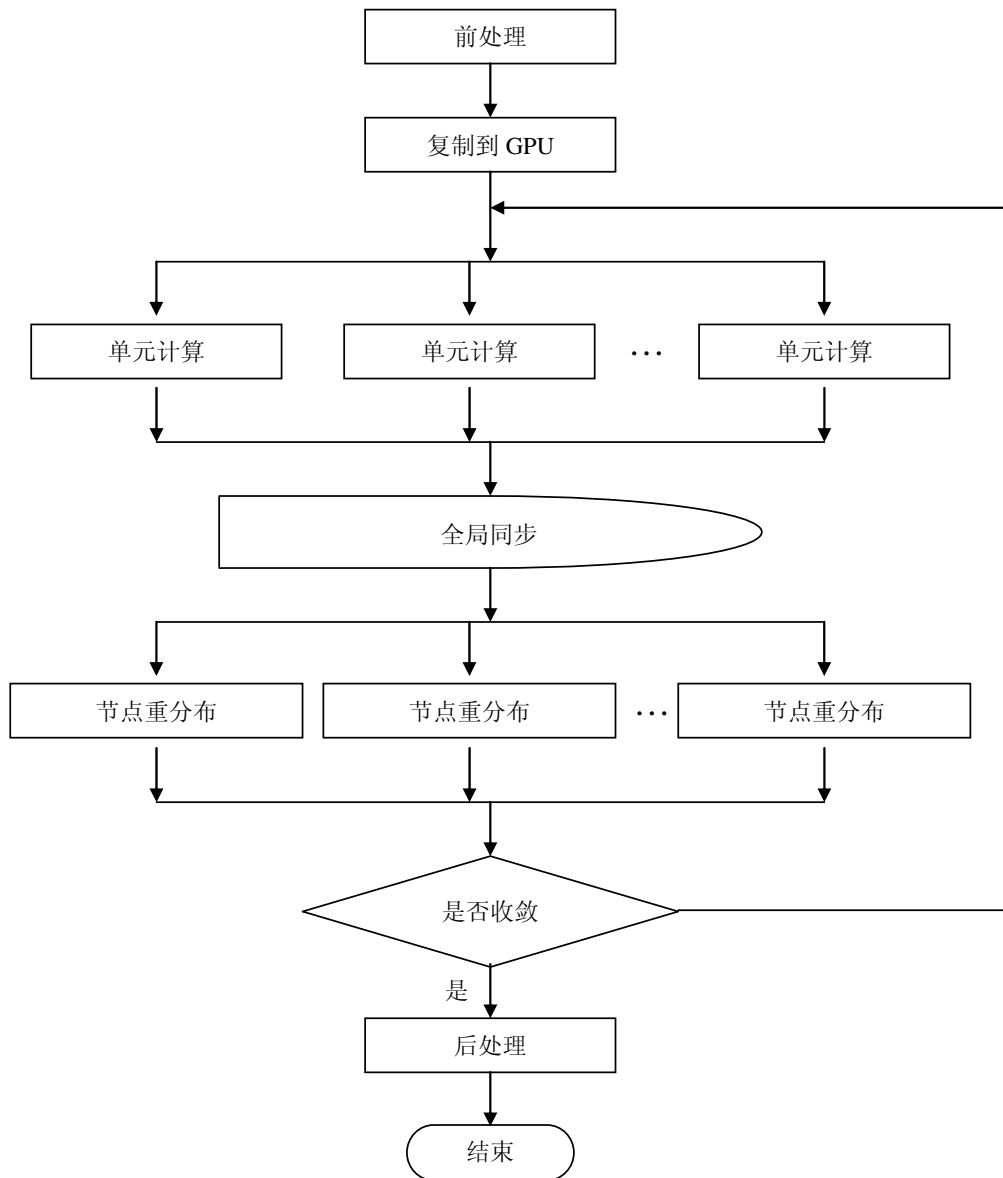


图 1 CDEM 并行计算流程图

单元的计算流程根据 GPU 的特性进行了优化。GPU 由一些列单指令多线程的多处理器

(也即 CUDA 中的块) 组成, 每个多处理器包含一个指令单元及若干个标量计算核 (也即 CUDA 中的 线程), 每个标量计算核执行独立的计算功能。GDEM 中的单元被分配到不同的块中进行计算, 每个块含有一定数量的 GDEM 单元。根据验证, 一个块中包含 32 个 GDEM 单元, 计算效率最佳。如图 2 所示, CUDA 中的块被分成了若干线程, 每个线程计算一个节点。

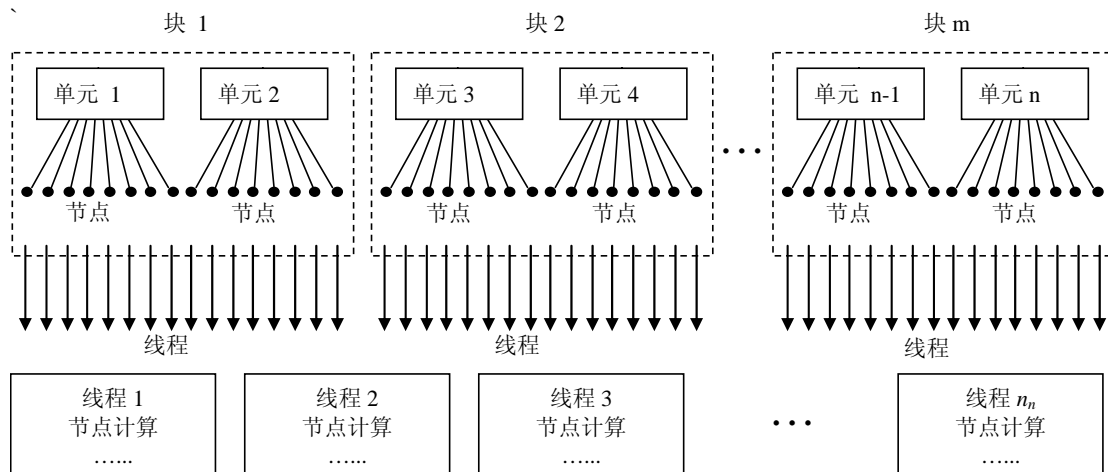


图 2 单元计算中的线程分配方法 (每个块中含 32 个单元)

同样, 节点力的重分配方法与上述块体-线程的架构方法相同, 每个 CUDA 块包含若干节点力组, 每个节点力组为一个独立的线程。(图 3)

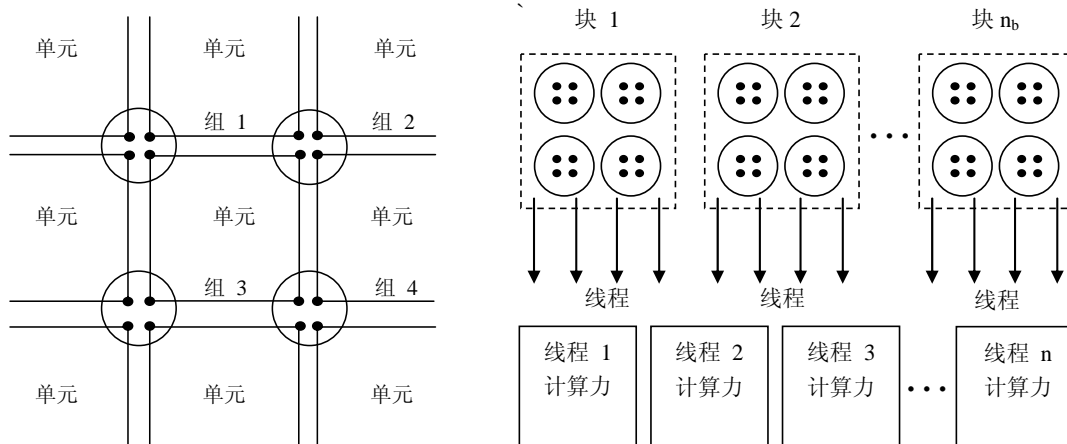


图 3 节点力组

七、GDEM 中 GPU 的加速效果

1、混凝土块弹性场计算

包含 1000 个六面体单元的混凝土块，在重力作用下的弹性位移场如图 1 所示，CPU 计算耗时 252 秒，GPU 计算耗时 0.478 秒。

GPU 配置：GeForce GTX285；CPU 配置：Core (TM) 2，1.86GHZ。

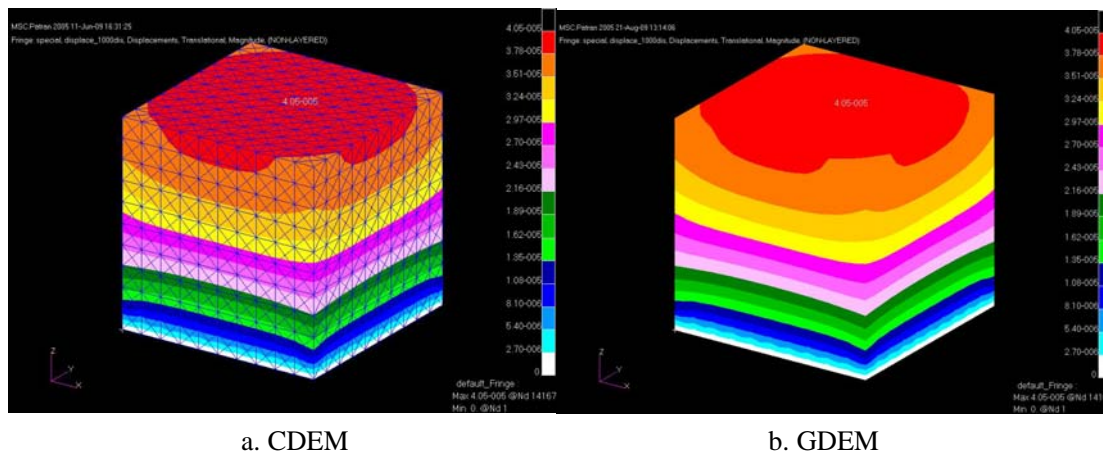


图 1 混凝土弹性场计算

2、长城烽火台弹性场计算

41232 个六面体单元，4000 迭代步，CDEM 耗时 95 分钟，GDEM 耗时 6.1 秒，商用软件 FLAC3D 耗时 13 分钟。（图 2）

GPU 配置：GeForce GTX285；

CPU 配置：Core (TM) 2，1.86GHZ。

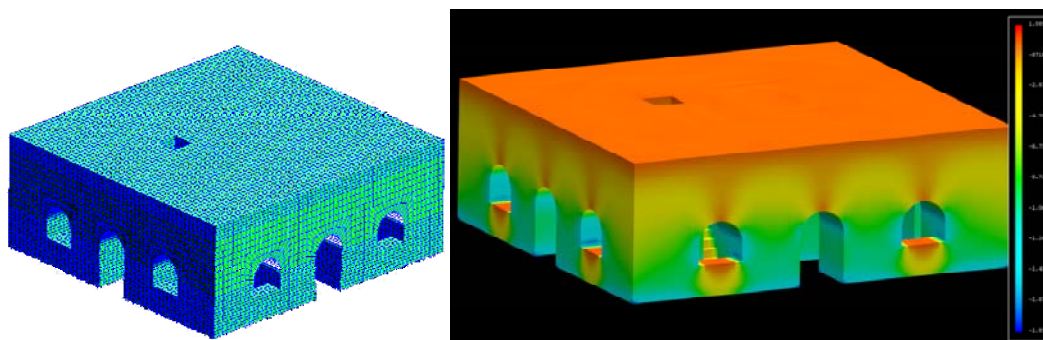


图 2 长城烽火台弹性场计算

3、凉水井滑坡弹性场计算

85800 个六面体单元，5000 迭代步，GDEM 耗时 12.5 秒，商用软件 FLAC3D 耗时 2170 秒。（图 3）

GPU 配置：GeForce GTX485；

CPU 配置: Core (TM) 2, 1.86GHZ。

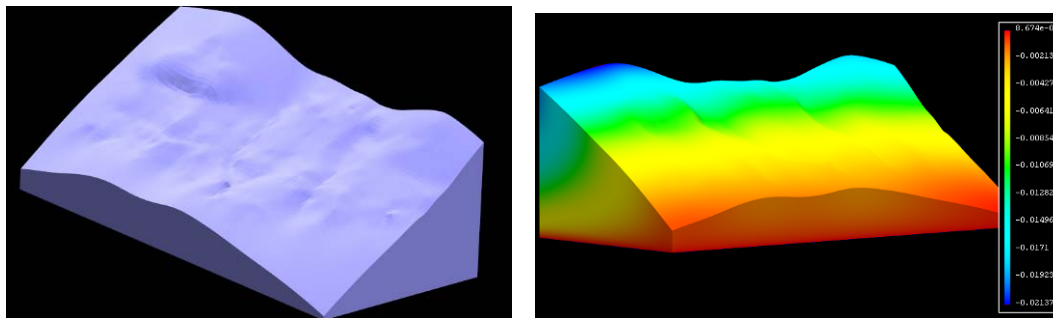


图 3 凉水井滑坡弹性场计算

4、露天矿边坡弹性场计算

33.5 万个六面体单元，53 秒完成弹性场计算。

GPU 配置: GeForce GTX485;

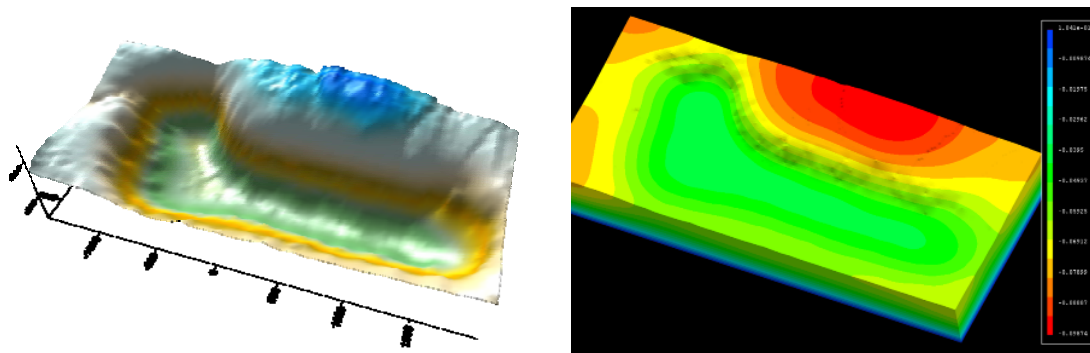


图 4 露天矿边坡弹性场计算

5、三维地质体计算模型

127 万个四面体单元，耗时不超过 8 分钟。

GPU 配置: GeForce GTX485;

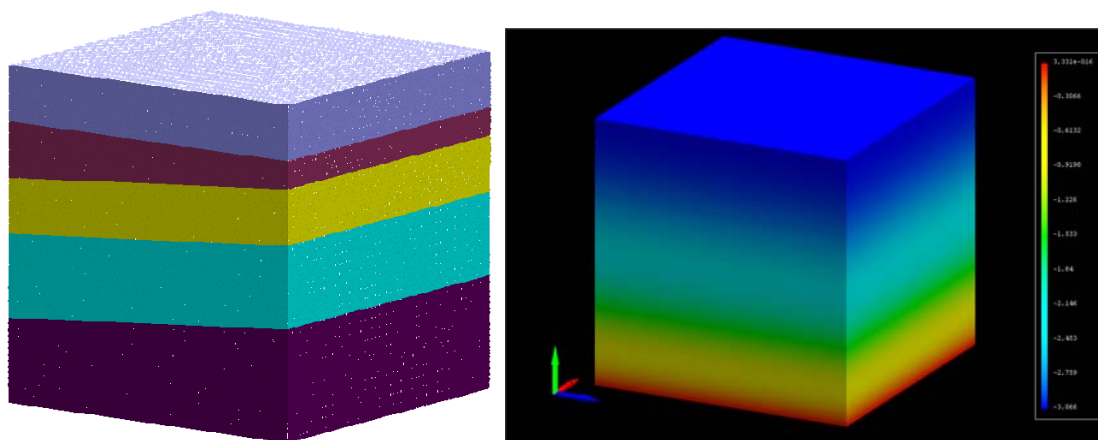


图 5 三维地质体弹性场计算

6、计算效率统计

(1) 连续问题

在求解连续问题时，GDEM 的计算效率如图 6 所示（GPU 配置：GeForce GTX485），具体统计数据如表 1 所示。

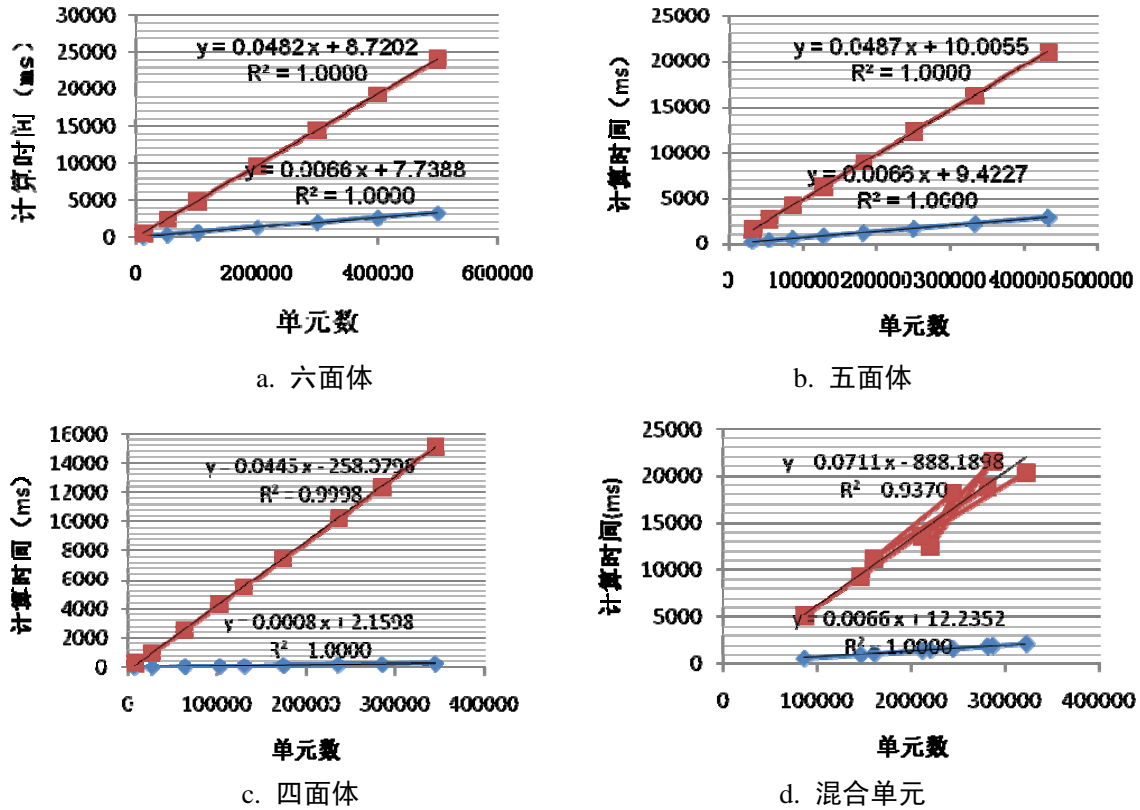


图 6 单元类型与计算时间的关系

表 1 各种单元类型的计算效率对比

连续问题 1000 个计算单元迭代 1000 次的计算时间				
单元类型	六面体	五面体	四面体	混合单元
产生刚度阵时间(ms)	6.6	6.6	0.8	6.6
迭代时间(ms)	48.2	48.7	44.5	71.1

(2) 离散问题

在求解非连续问题时，GDEM 的计算效率如图 7 所示（GPU 配置：GeForce GTX485），具体统计数据如表 2 所示。

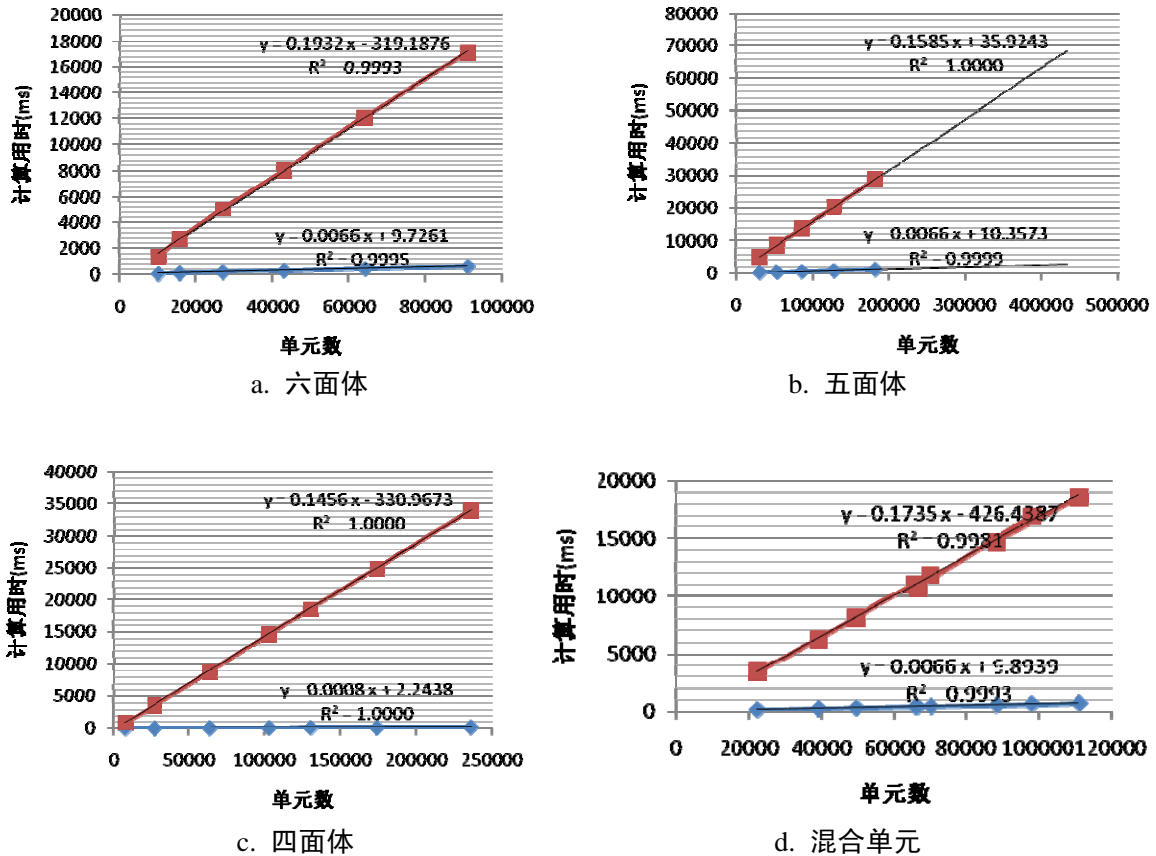


图 7 单元类型与计算时间的关系

表 2 各种单元类型的计算效率对比

离散系统 1000 个计算单元迭代 1000 次的计算时间				
单元类型	六面体	五面体	四面体	混合单元
产生刚阵时间(ms)	6.6	6.6	0.8	6.6
迭代时间(ms)	193.2	158.5	145.6	173.5

(3) 最终统计

总体而言, 计算线弹性问题, 每 1 万个单元迭代 1 万步, 耗时为 4-7 秒, 且迭代 5000 步左右, 可以得到较为准确的弹性场。

1000 个计算单元迭代 1000 次的计算时间					
单元类型		六面体	五面体	四面体	混合单元
产生刚阵时间(ms)	连续问题	6.6	6.6	0.8	6.6
	离散系统	6.6	6.6	0.8	6.6
迭代时间(ms)	连续问题	48.2	48.7	44.5	71.1
	离散系统	193.2	158.5	145.6	173.5

八、GDEM 在各领域中的应用实例

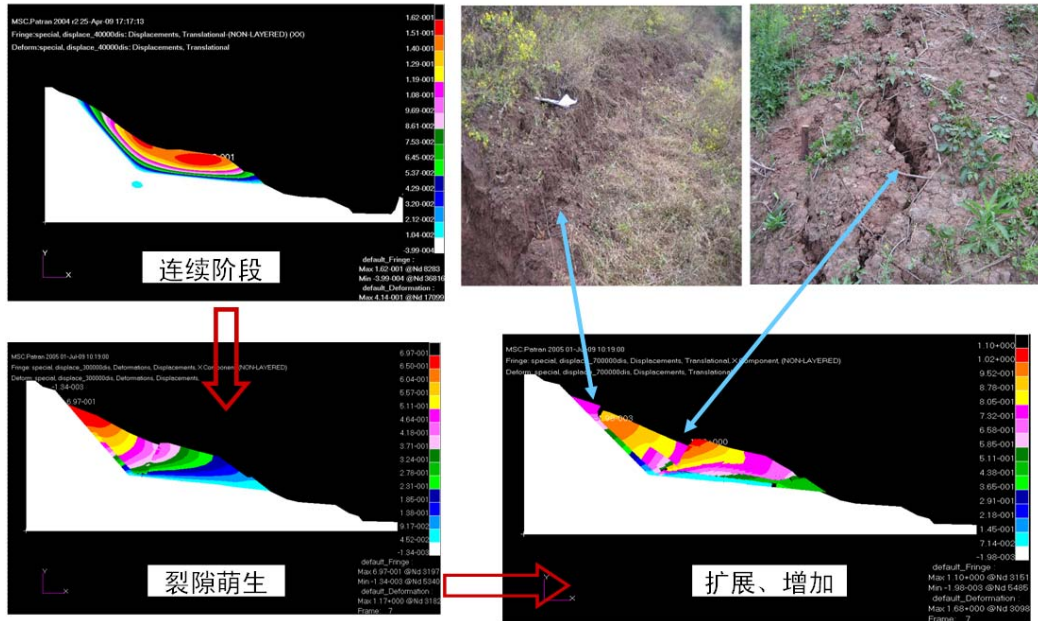


图 1 云阳凉水井滑坡模拟

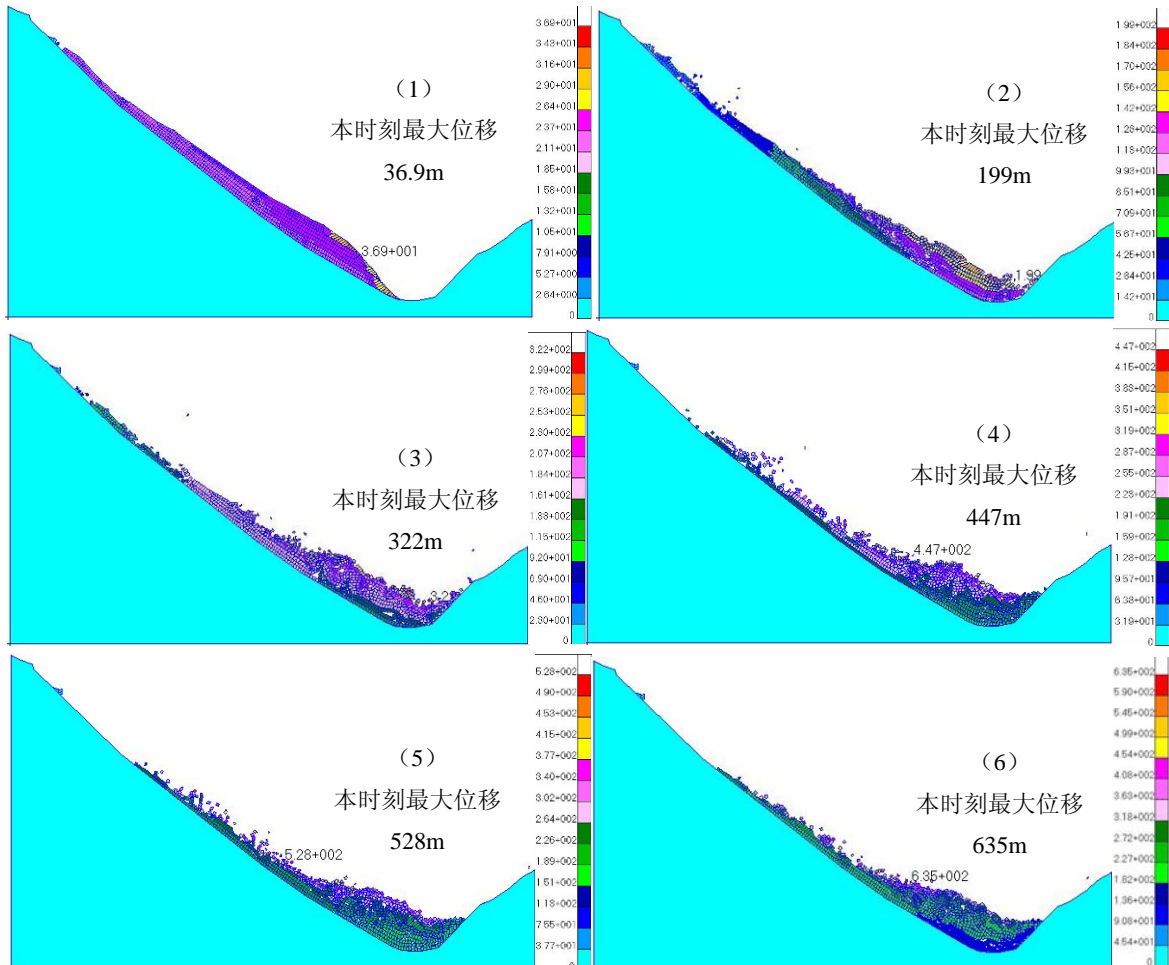


图 2 地震诱发的唐家山滑坡

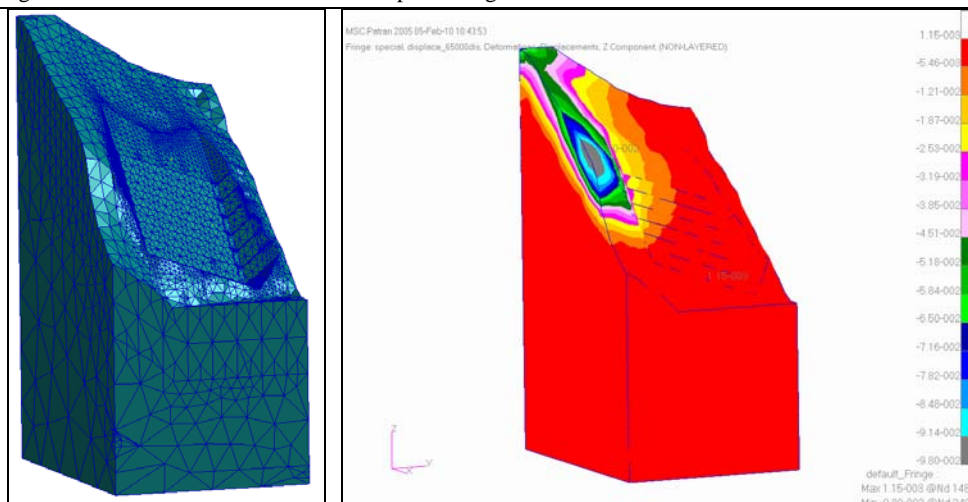


图 3 开挖卸荷后岩质边坡的稳定性计算

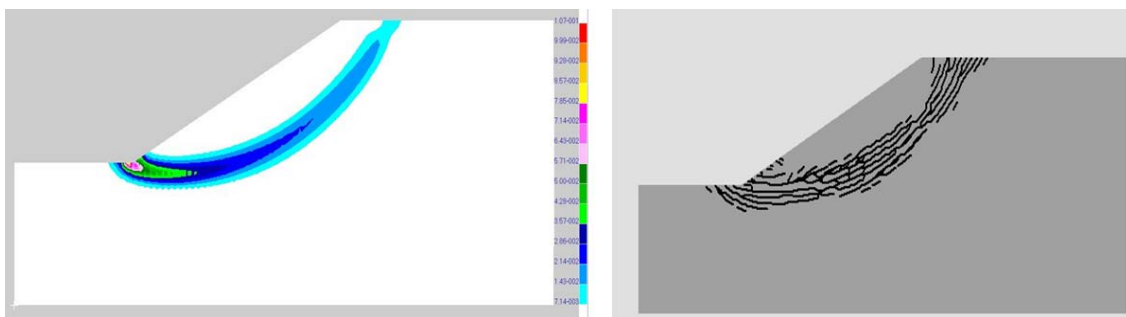


图 4 边坡内部塑性区的演化及局部化带扩展

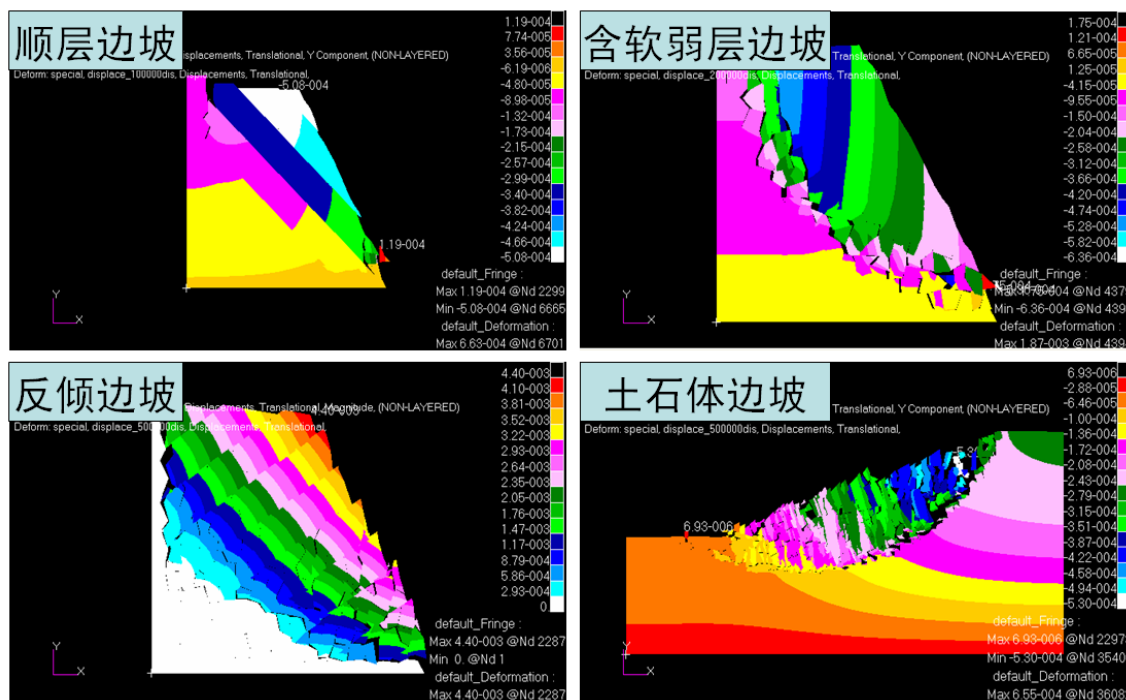


图 5 不同结构面产状的节理化岩质边坡的破坏模式

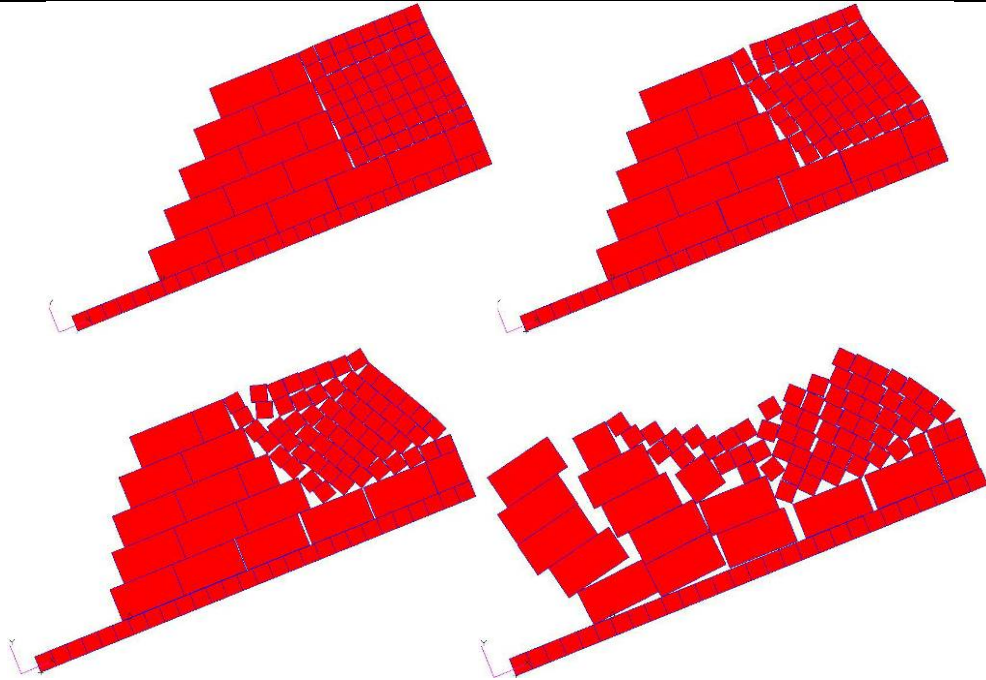
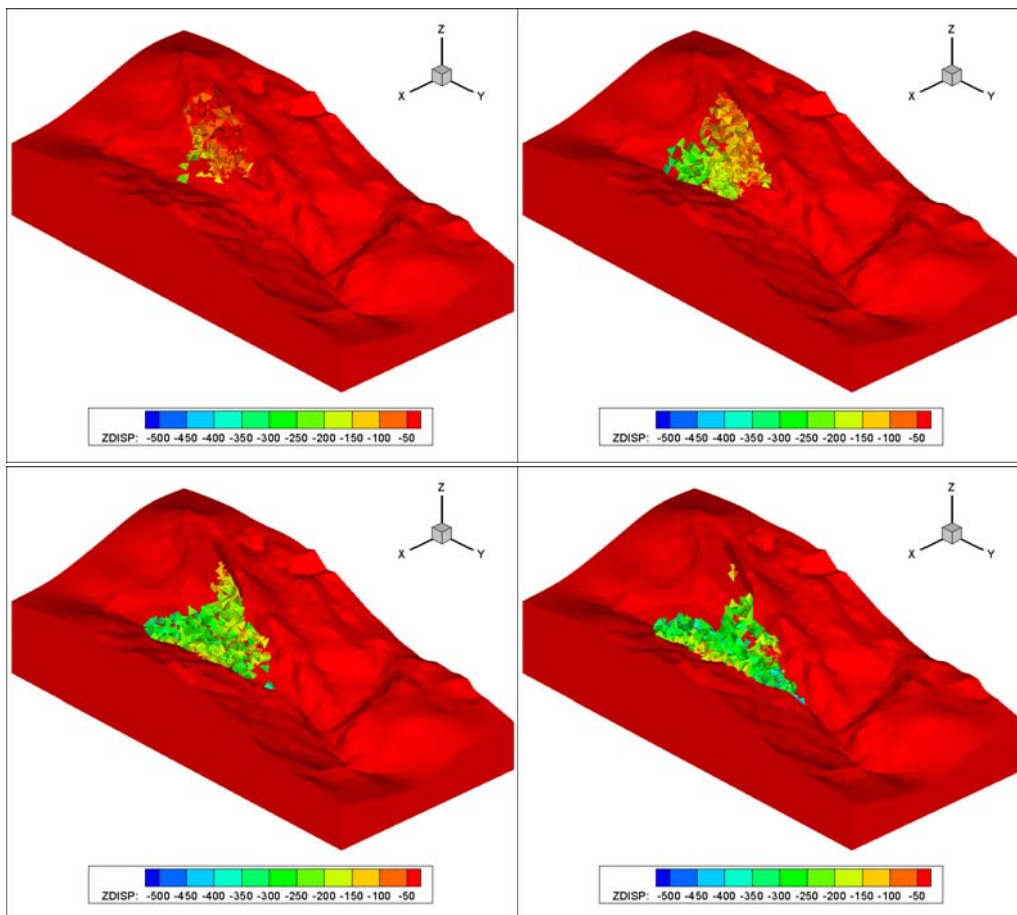


图 6 混合块体的破坏模式



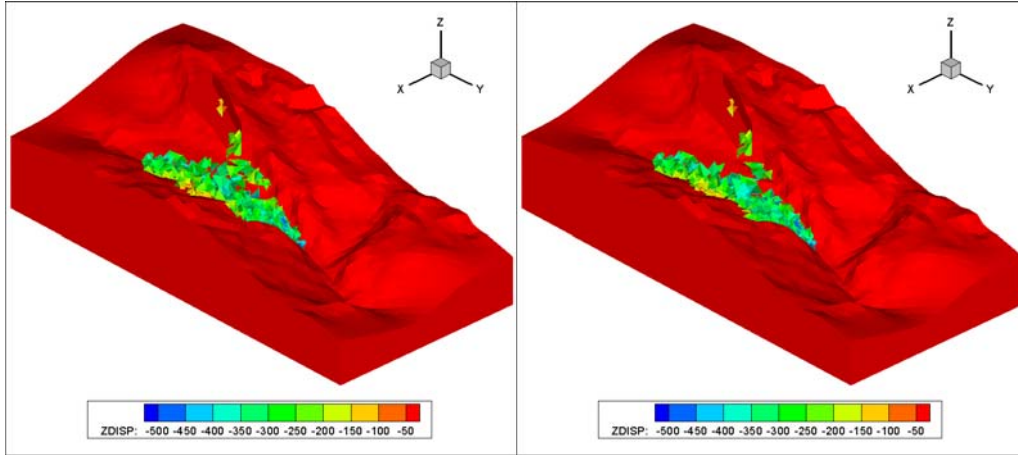


图 7 GDEM 计算鸡尾山滑坡

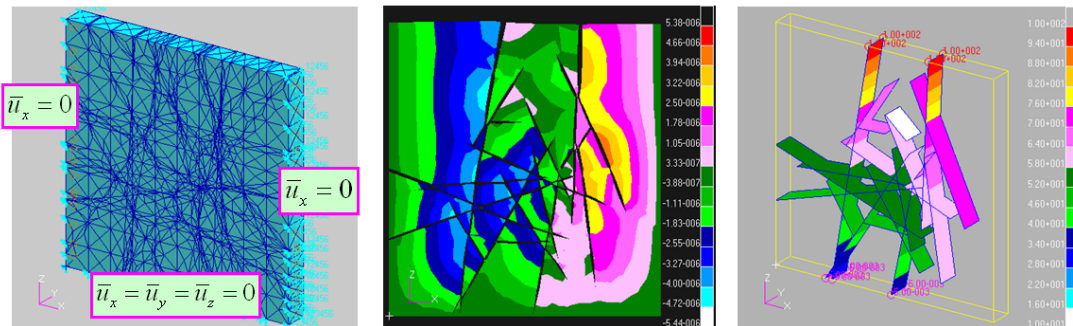


图 8 岩体中的裂隙渗流-应力耦合模型

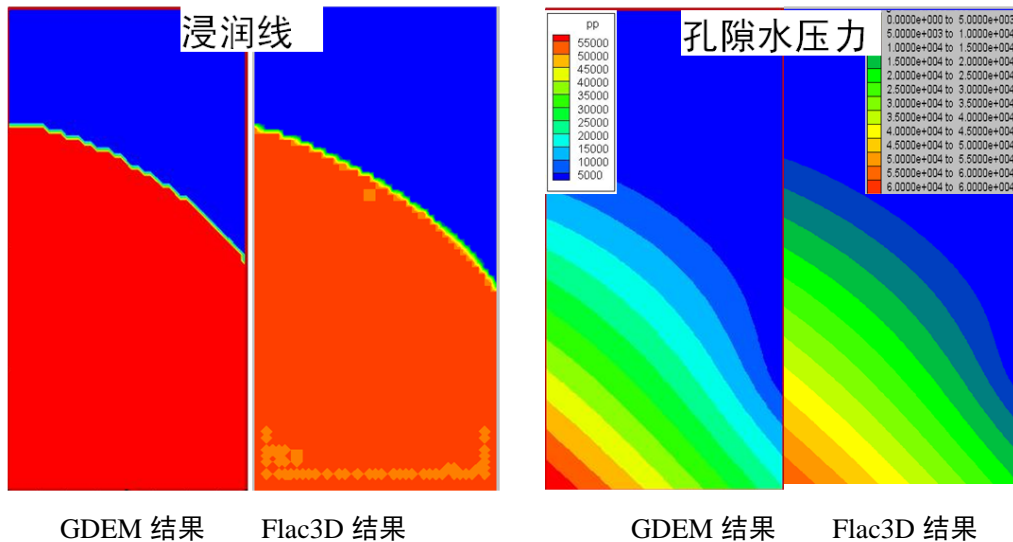


图 9 孔隙渗流模型的结果对比

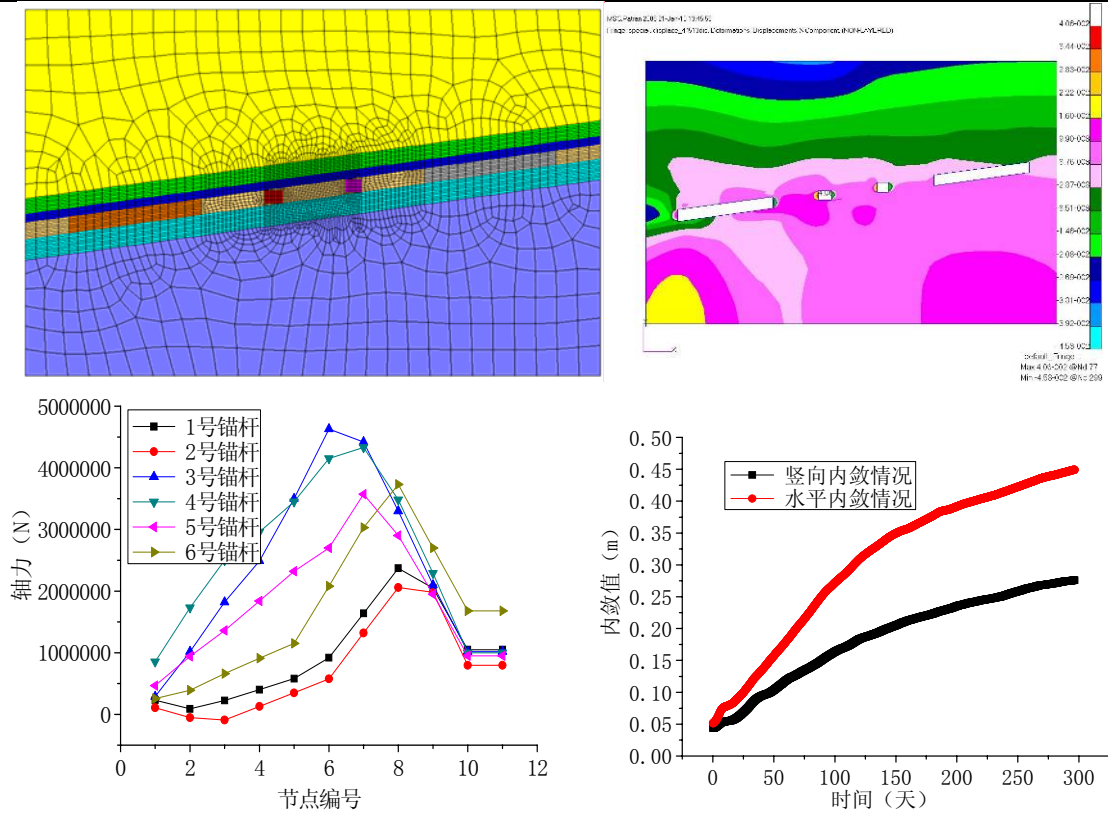


图 10 煤矿开挖支护中的弹性及蠕变计算

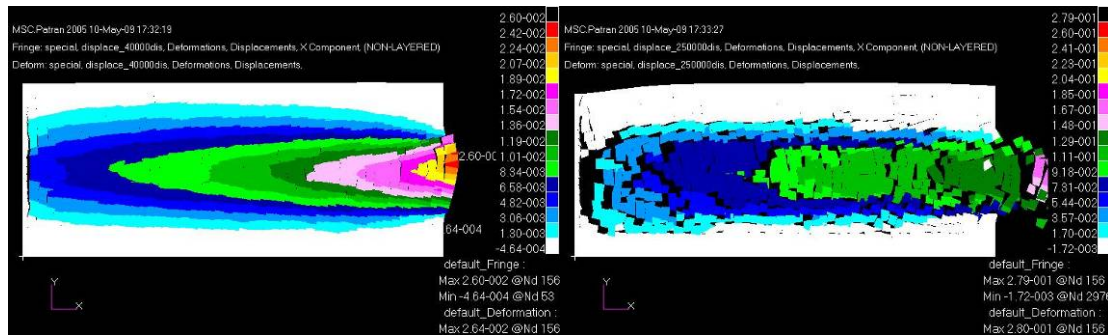


图 11 煤与瓦斯突出的模拟

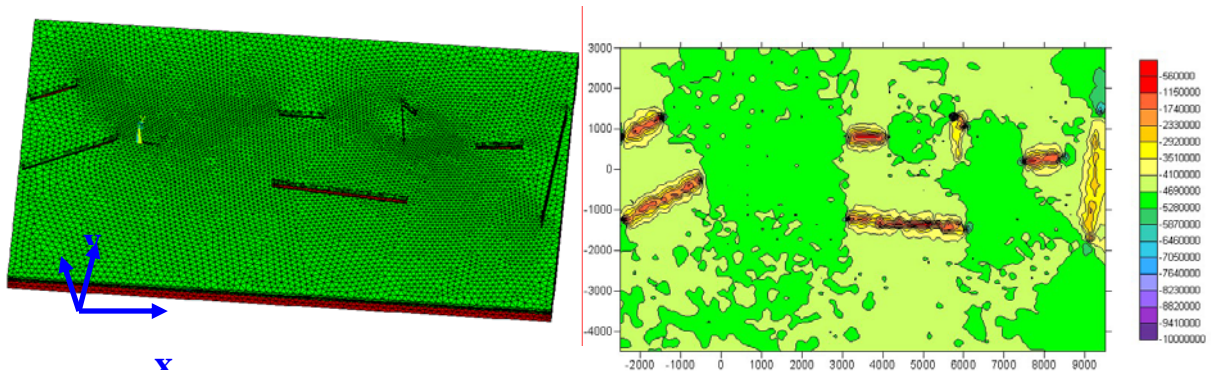


图 12 山西常村煤矿断裂带对应力场的影响

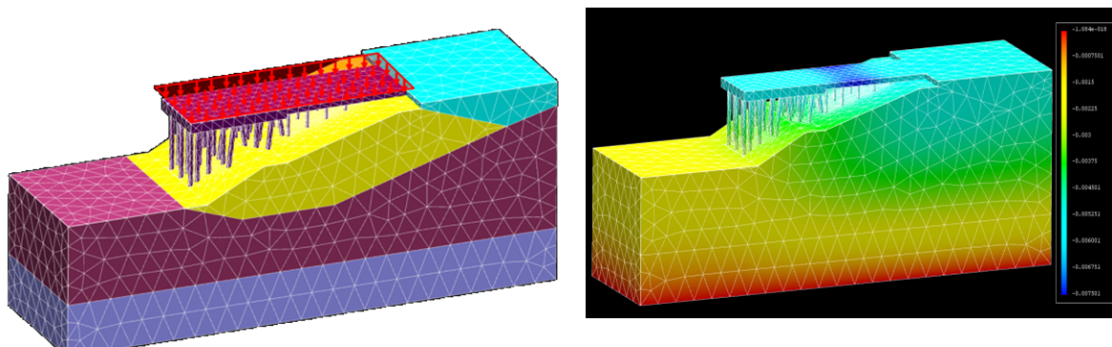


图 13 高桩码头前承台受力时的位移场分析

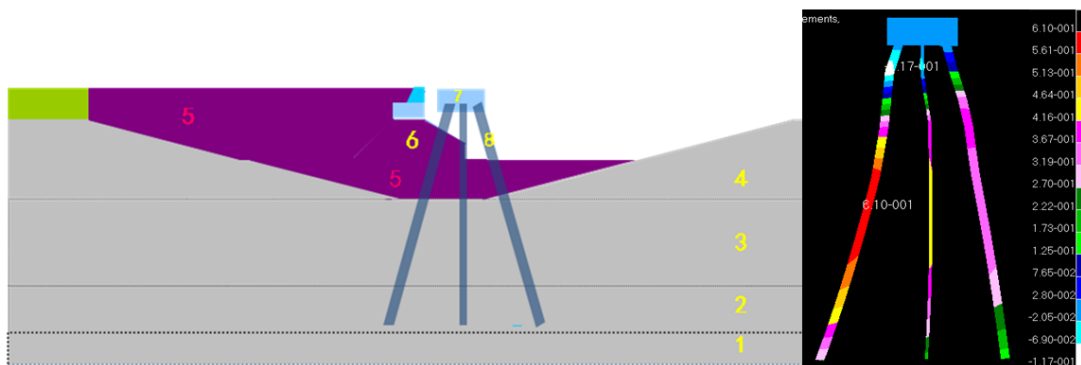


图 14 码头桩基与土体的相互作用

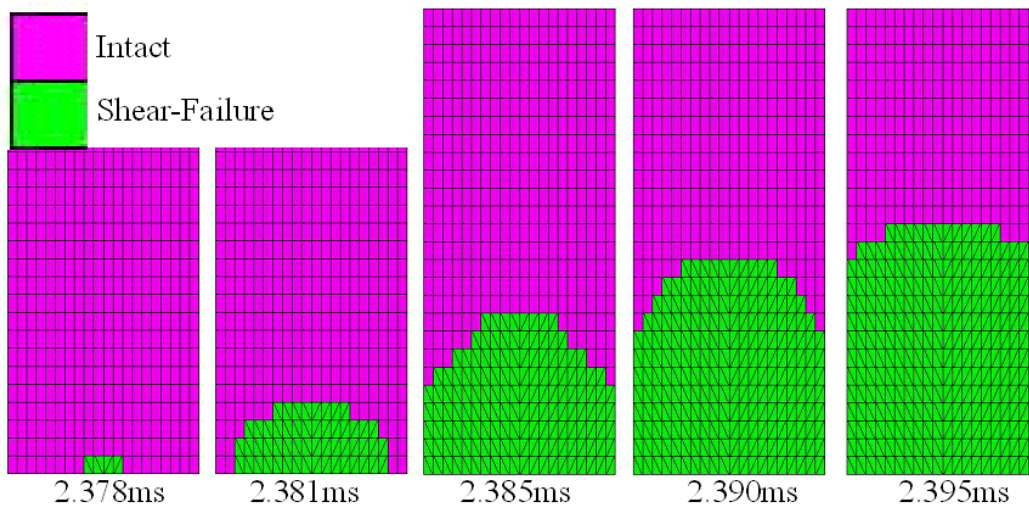


图 15 打桩引起的桩尖破坏

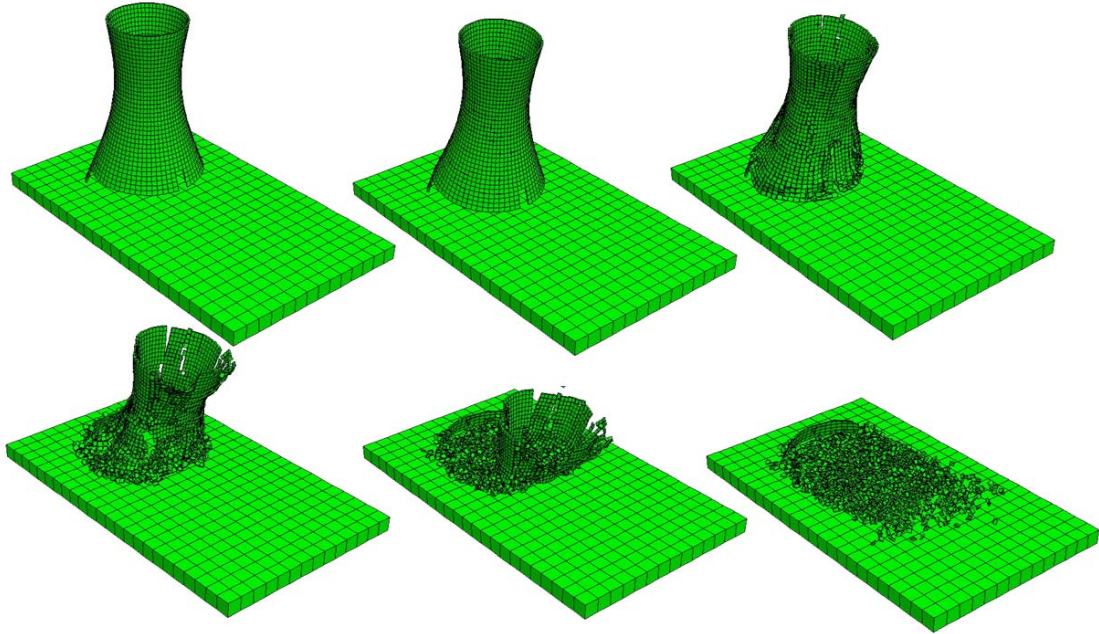


图 16 冷却塔的爆破拆除

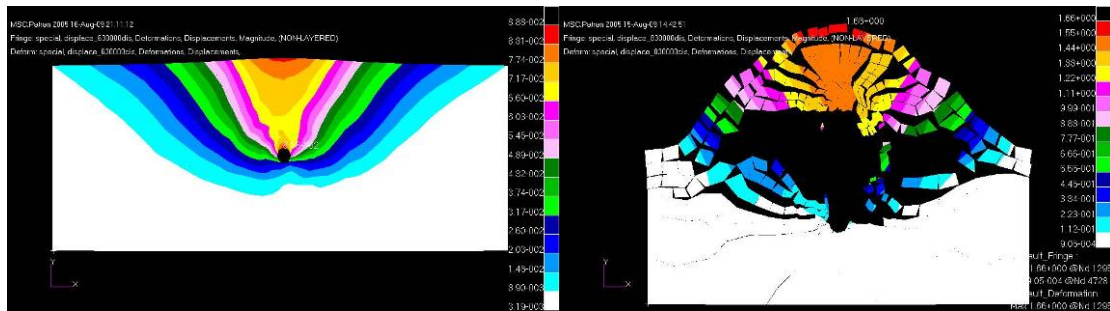


图 17 完整岩体及裂隙岩体在相同炸药药量下的不同响应

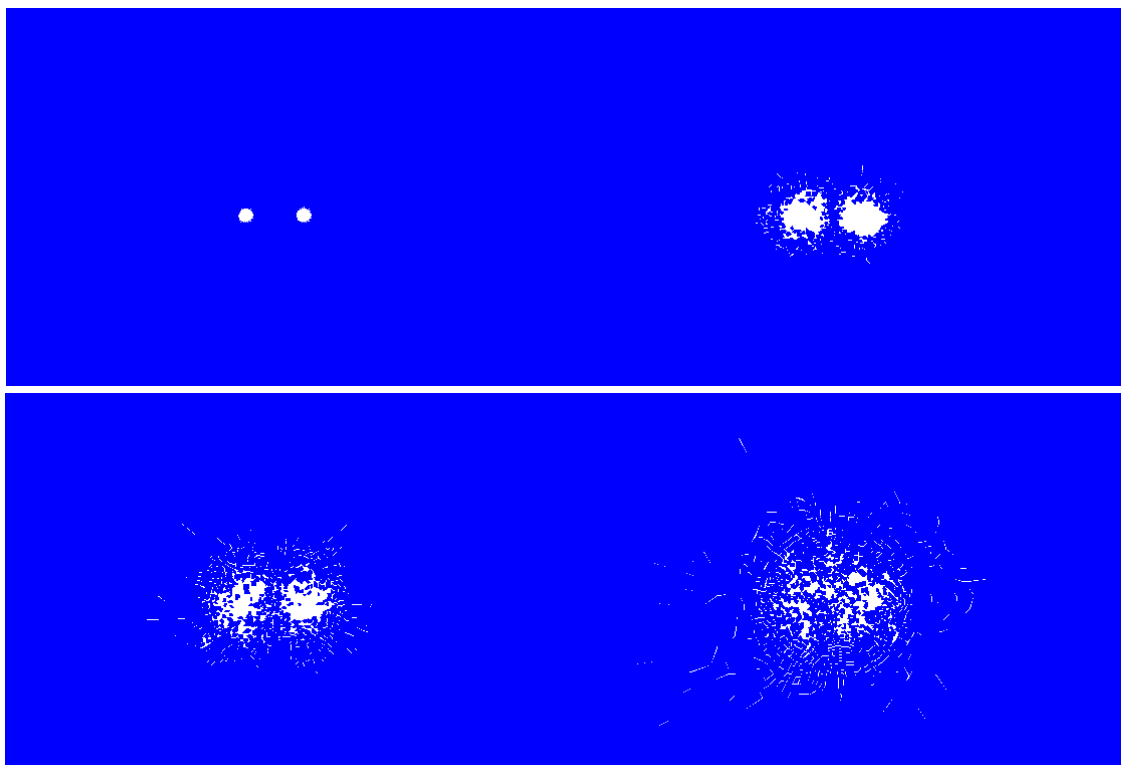


图 18 高围压作用下岩体的爆破效果模拟

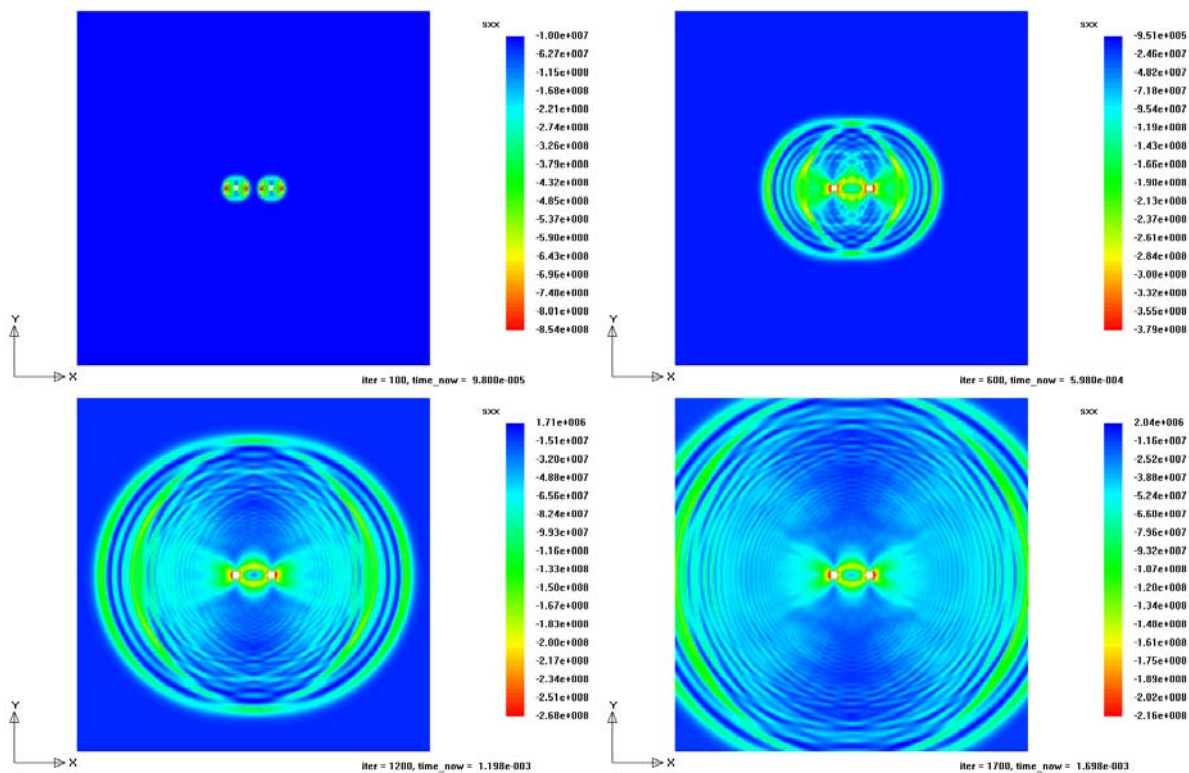


图 19 高围压作用下爆破导致的应力波传播效果模拟

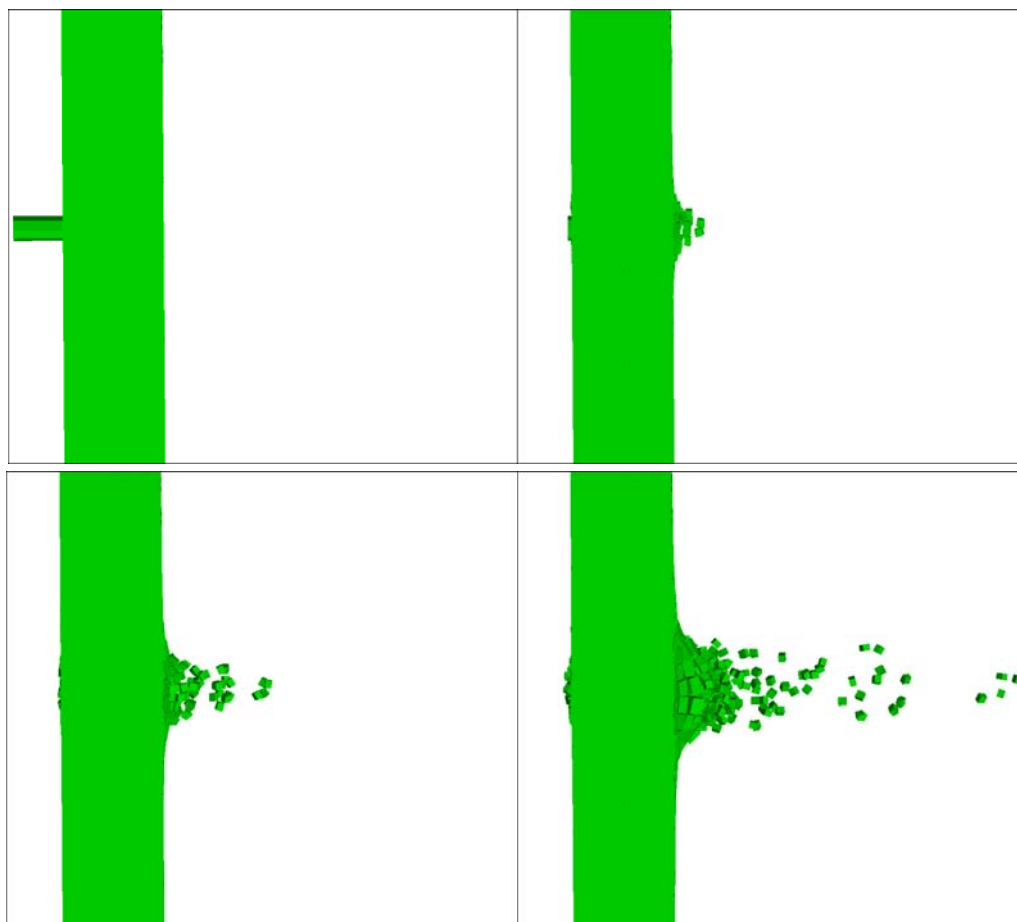


图 20 GDEM 计算子弹穿越混凝土

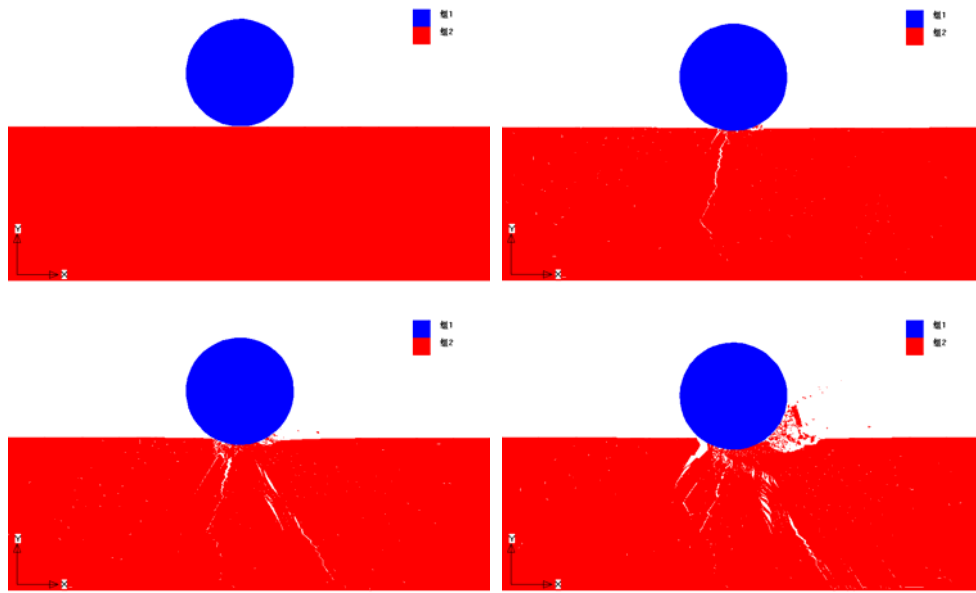


图 21 TBM 滚刀破岩机理的模拟

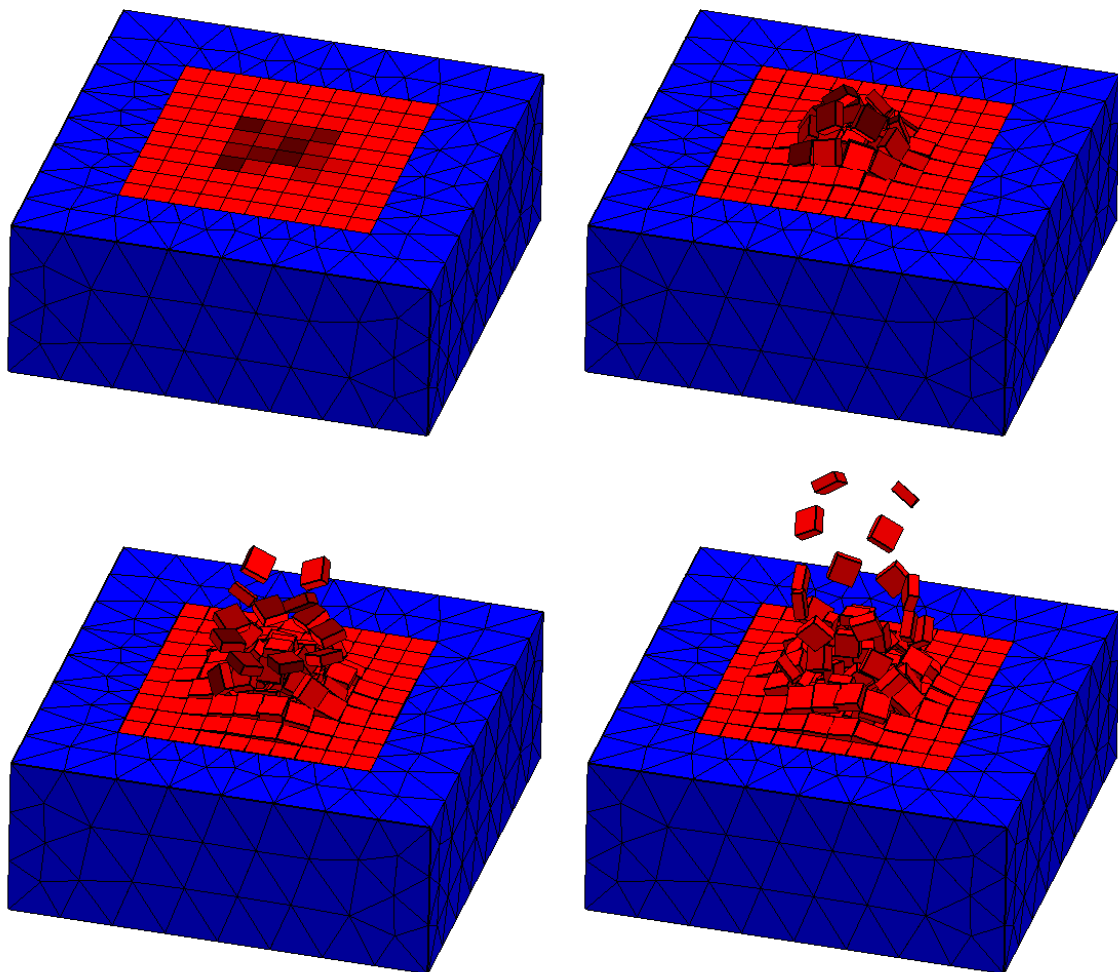


图 22 块状岩体中的爆破模拟

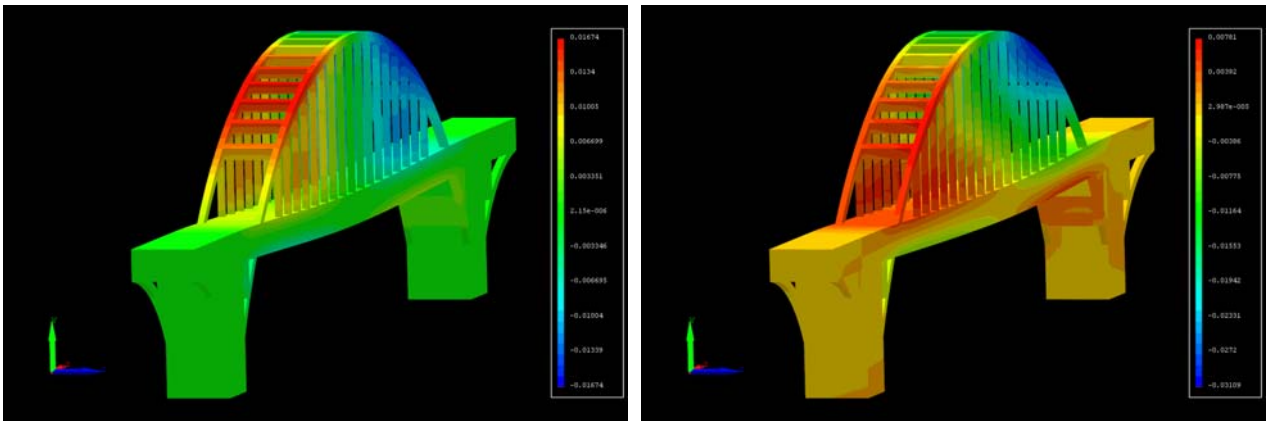


图 23 地震作用下桥梁的稳定性

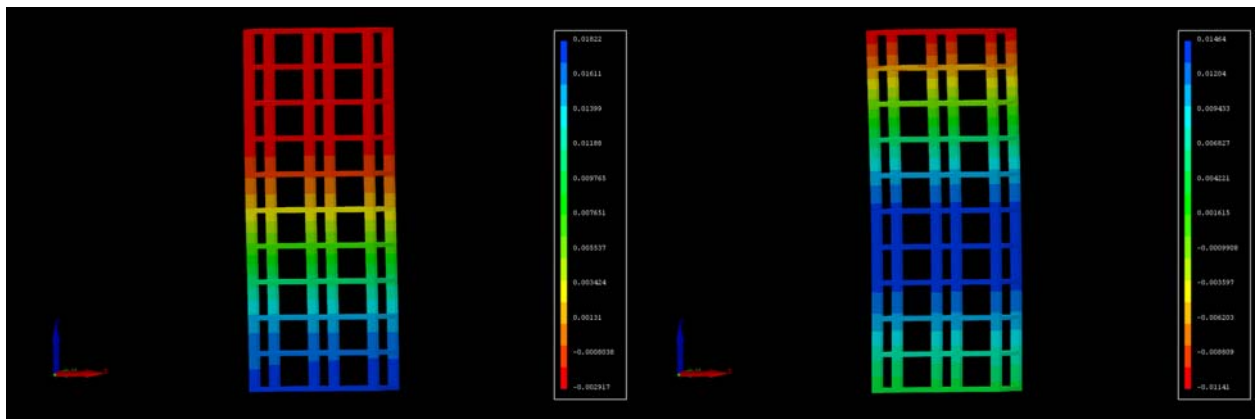


图 24 地震作用下高层建筑结构的稳定性

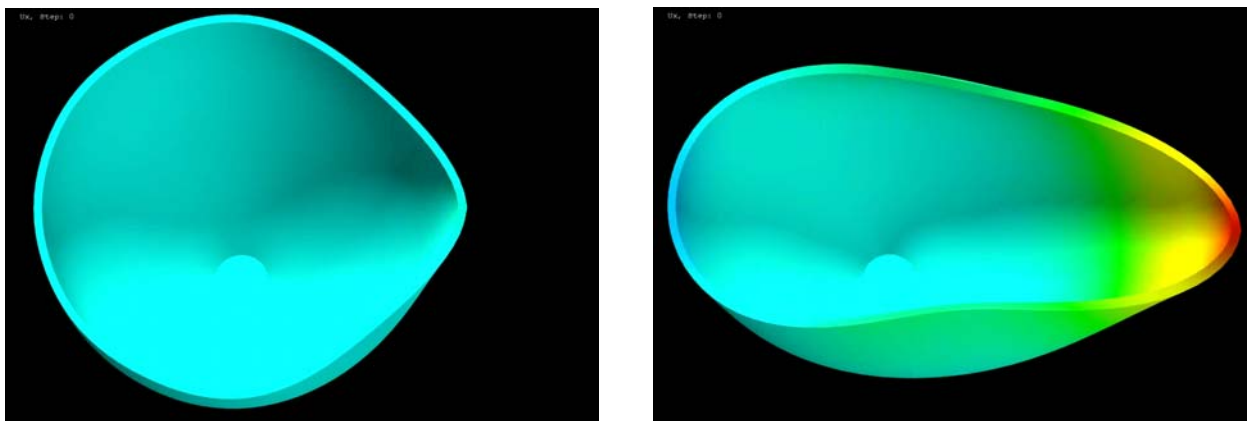


图 25 GDEM 在结构塑型中的应用

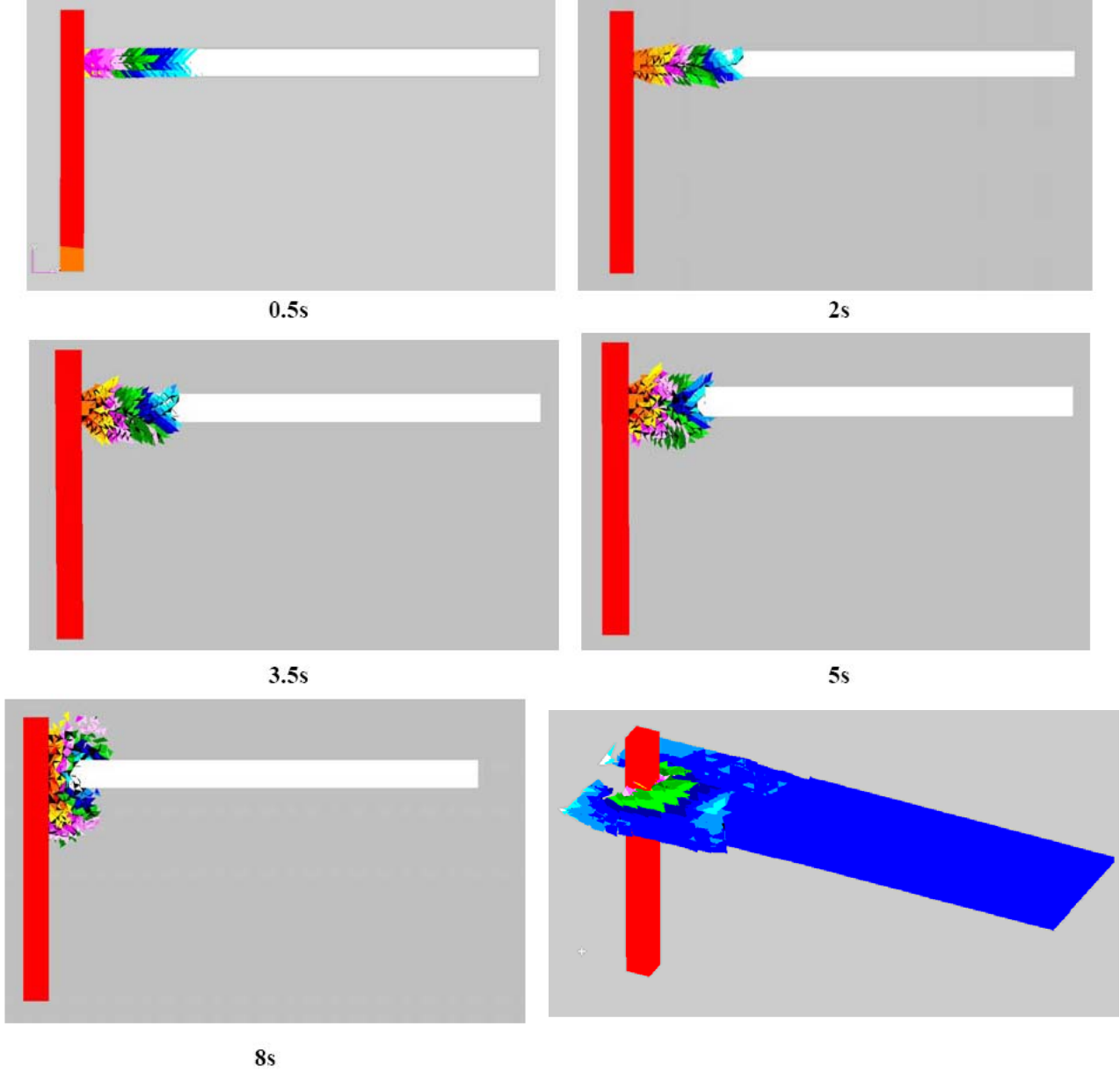


图 26 海冰与结构相互作用的数值模拟