

CDEM力学分析系列软件

中国科学院力学研究所
非连续介质力学及工程灾害联合实验室
二零一三年

目 录

CDEM 简介	1
CDEM 的应用领域	2
CDEM 的基本模型	4
CDEM 中 GPU 的加速效果	6
CDEM 在边坡工程中的应用——连续到非连续	7
CDEM 在边坡工程中的应用——运动性破坏	8
CDEM 在边坡工程中的应用——渗流应力耦合	9
CDEM 在采矿工程中的应用	10
CDEM 在爆破工程中的应用	12
CDEM 在高速冲击中的应用	13
CDEM 在隧道工程中的应用	14
CDEM 在结构工程中的应用	15
CDEM 在机械工程中的应用	16
CDEM 在颗粒问题中的应用	17
CDEM 在流体问题中的应用	18
CDEM 在其他领域的应用	19

CDEM 简介

连续-非连续单元方法（Continuum-discontinuum element method, CDEM）是中国科学院力学研究所非连续介质力学及工程灾害联合实验室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。该方法将连续介质算法（如有限元）与非连续介质算法（如离散元）进行耦合，通过单元内部及单元边界的断裂，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。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，鉴于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。将CDEM进行GPU化，大大提升了计算速度及计算容量。以GPU中档配置（NVIDIA GTX 580）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4-7秒。

CDEM 力学分析系列软件具有以下特点：

- 连续与非连续单元的结合——块体-连续单元，界面-非连续
- 显式求解——欧拉前差法
- GPU 加速器——加速比较同类显式求解软件快100-200倍
- 大变形计算——实时更新单元坐标系
- 全域内接触自动搜索——不需要指定接触对

CDEM 的应用领域

1、边坡领域

- (1) 大型三维复杂边坡的整体稳定性分析，危险区域评价，支挡结构的选型及优化设计；
- (2) 降雨、库水涨落情况下边坡的渗流场、应力场耦合分析，边坡在渗流场作用下的失稳临界点分析；
- (3) 地震作用下，应力波在边坡中的传播耗散过程分析，应力波导致的边坡渐进破坏过程分析；
- (4) 人工开挖过程中，边坡应力、位移场的变化及开挖近场区岩土体的失稳滑移分析；
- (5) 滑坡发生时，滑动过程的模拟及成灾规模的分析预测。

2、矿山领域

- (1) 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方案的优化设计；
- (2) 地下开采中，竖井稳定性、巷道稳定性分析，松动圈效应分析，冲击地压模拟，岩爆分析，支护方案的优选及瓦斯突出过程的模拟；
- (3) 露天开采与地下开采相互影响的力学分析；
- (4) 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；
- (5) 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。

3、隧道领域

- (1) 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；
- (2) 盾构机或爆破掘进隧道过程中，岩土体的破坏过程分析及掘进效果评价。

4、爆破与冲击领域

- (1) 高层建筑、冷却塔及工业烟囱的爆破拆除分析及爆破方案的优化设计；
- (2) 岩土介质中爆炸应力波的传播分析及爆破效果的模拟；
- (3) 子弹侵彻靶板等高速冲击问题的分析。

5、水电与港口领域

CDEM

- (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；
- (3) 地下水电站建设方案的优化设计、围岩与地下厂房相互作用的评价；
- (4) 海冰与海洋平台的相互作用分析及海洋平台整体稳定性评价；
- (5) 码头岸坡的整体稳定性分析及地震作用下码头抗震性能分析；
- (6) 海浪作用下防波堤扭王字块、扭工字块等护面块体的失稳分析及防波堤的优化设计。

6、其它领域

CDEM 在建筑结构分析、机械设备优化、油气开采评价、地震发震机制分析等方面同样发挥着重要的作用。

CDEM 的基本模型

CDEM 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。

CDEM 中 GPU 的加速效果

1、**长城烽火台弹性场计算**——41232 个六面体单元， CDEM 耗时6.1 秒， 商用软件FLAC3D 耗时13 分钟， CDEM 比FLAC3D 快一百多倍。

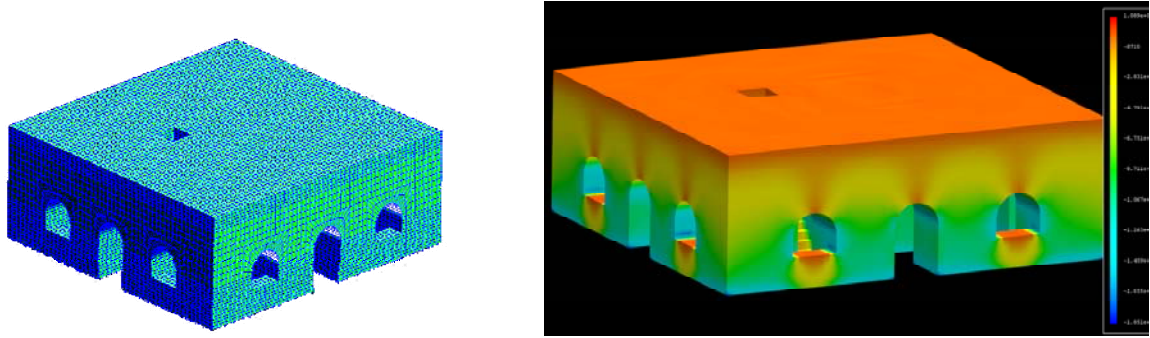


图1 长城烽火台弹性场计算

2、**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。

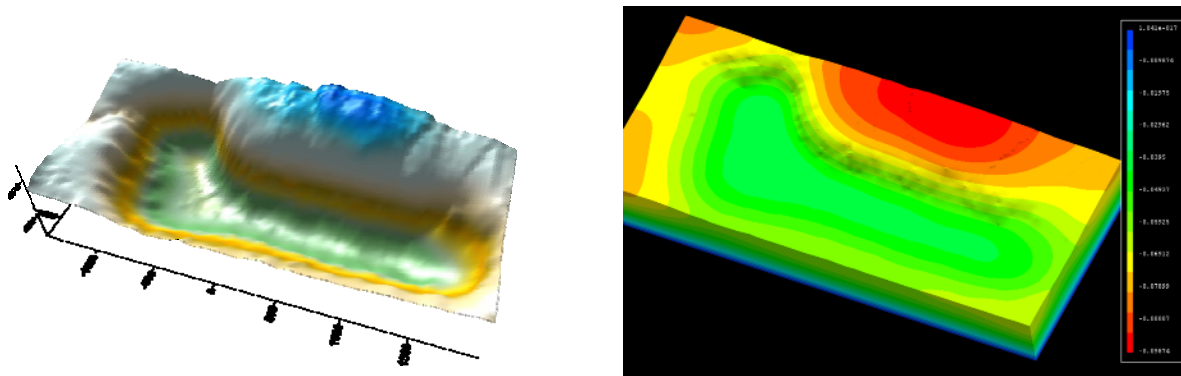


图2 露天矿边坡弹性场计算

3、**三维地质体应力场计算**——127 万个四面体单元 (图3 a)， 耗时不超过8 分钟; 277 万四面体单元 (图3 b)， 耗时不超过20 分钟。

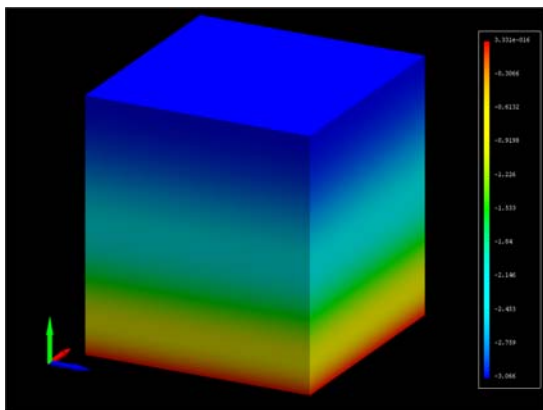


图3 a 三维地质体弹性场计算

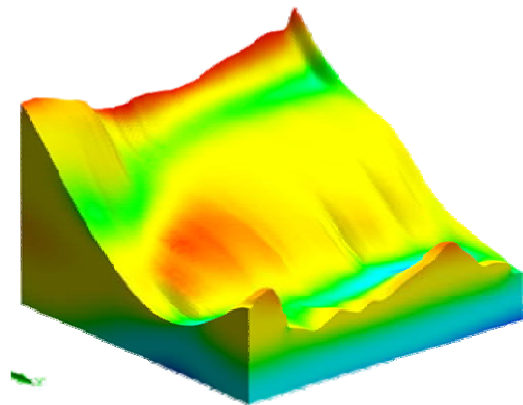


图3 b 边坡弹性场计算

CDEM 在边坡工程中的应用——连续到非连续

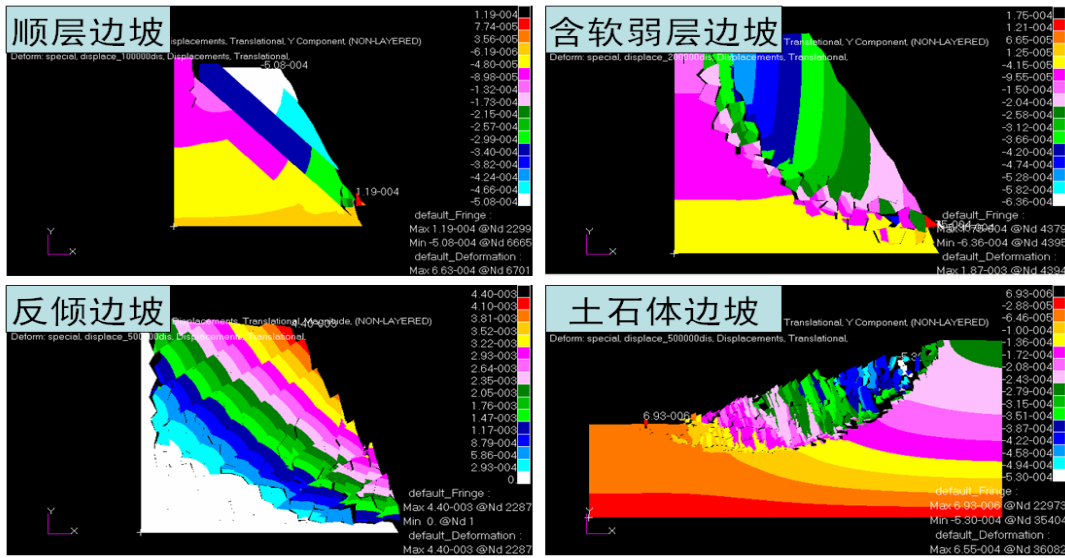


图1 不同结构面产状的节理化岩质边坡的破坏模式

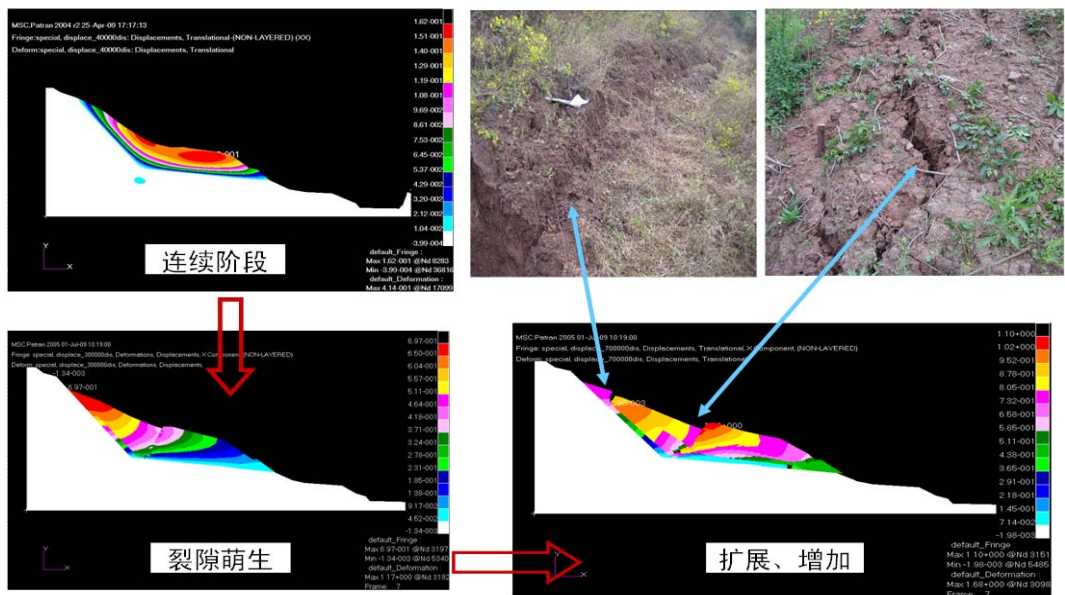


图2 云阳凉水井滑坡模拟

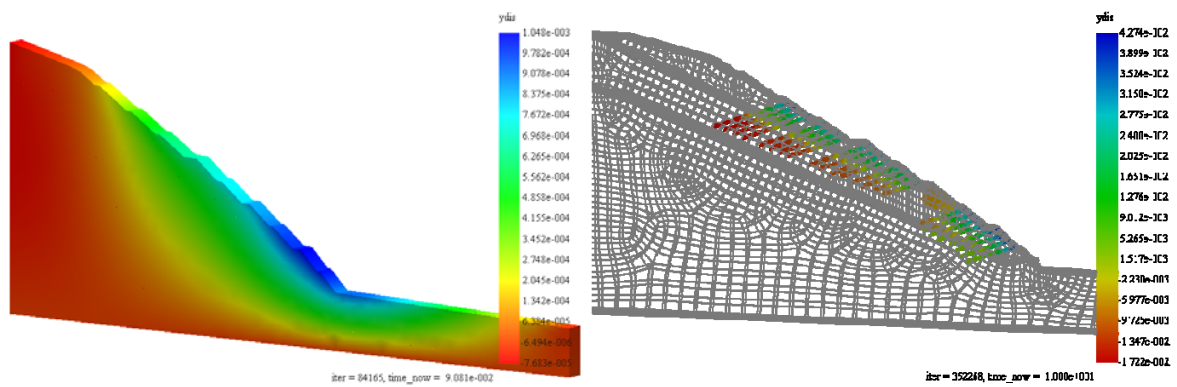


图3 云贵线白蜡寨车站高挖方边坡稳定性分析

CDEM 在边坡工程中的应用——运动性破坏

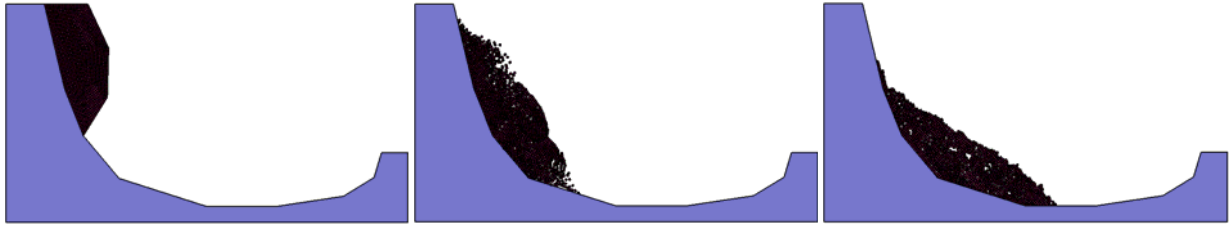


图1 典型崩塌的运动过程

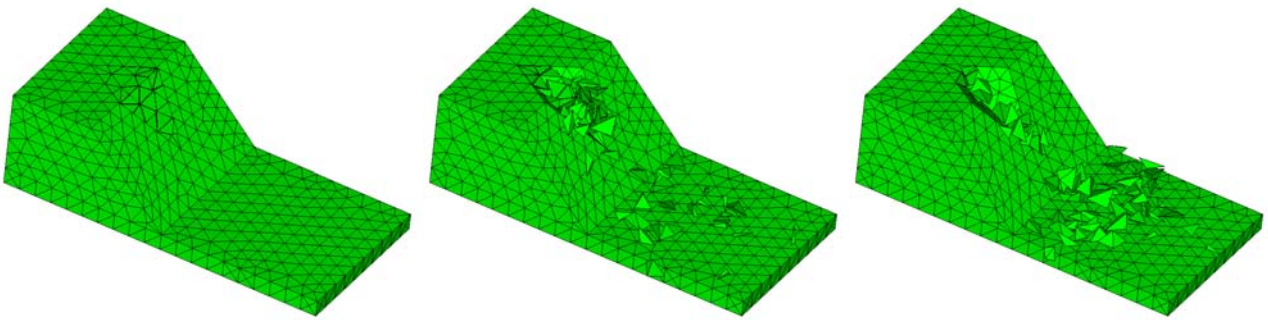


图2 典型楔形体滑坡运动破坏过程

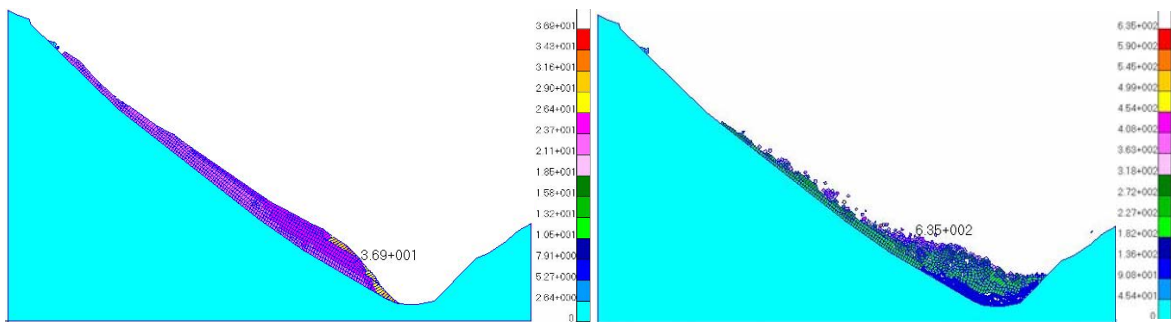


图3 地震诱发的唐家山滑坡

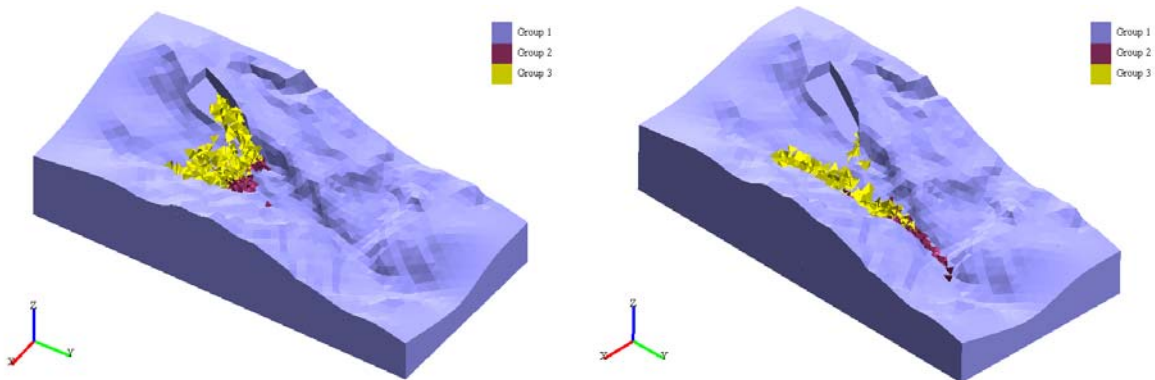


图4 重庆武隆鸡尾山模拟

CDEM 在边坡工程中的应用——渗流应力耦合

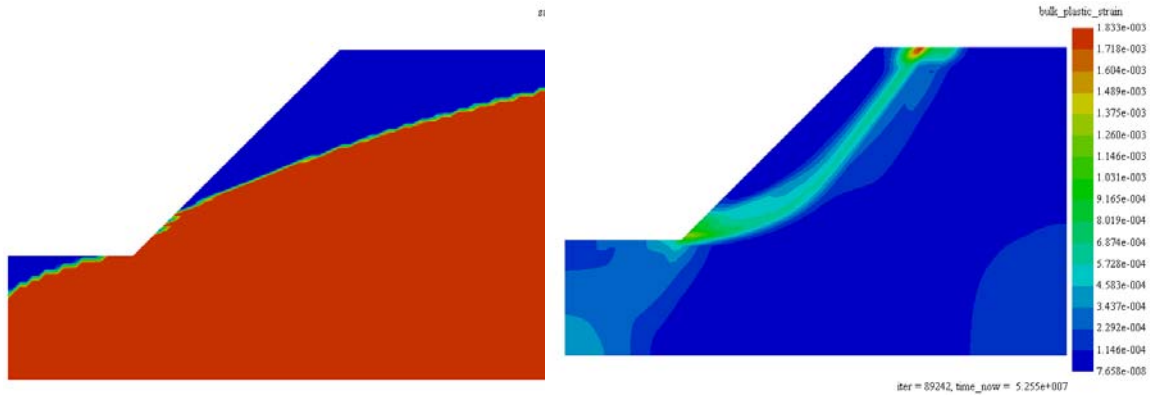


图1 高水位作用下边坡塑性剪切带的发展

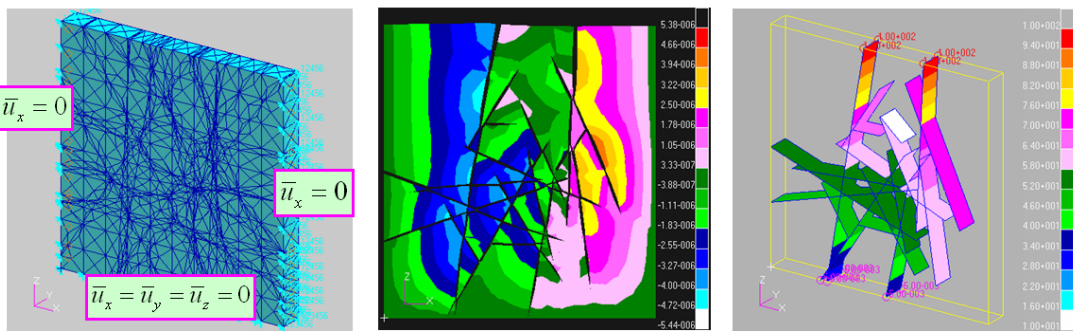


图2 岩体中的裂隙渗流-应力耦合

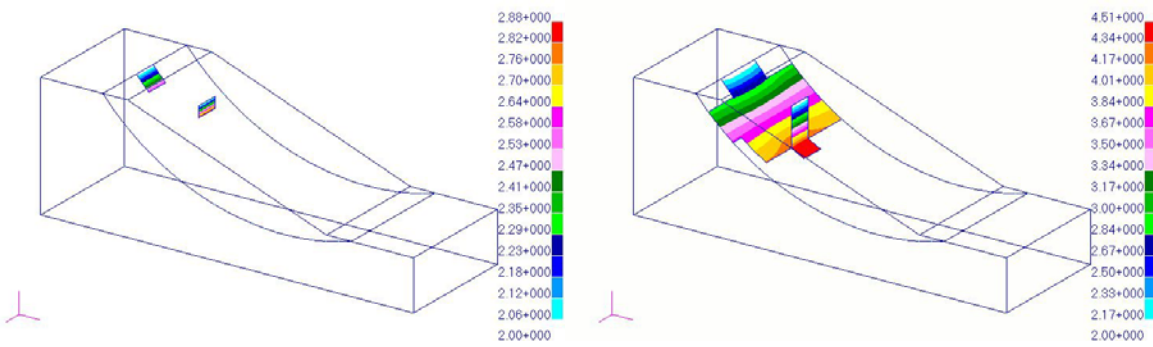


图3 降雨导致边坡内部裂隙的扩展

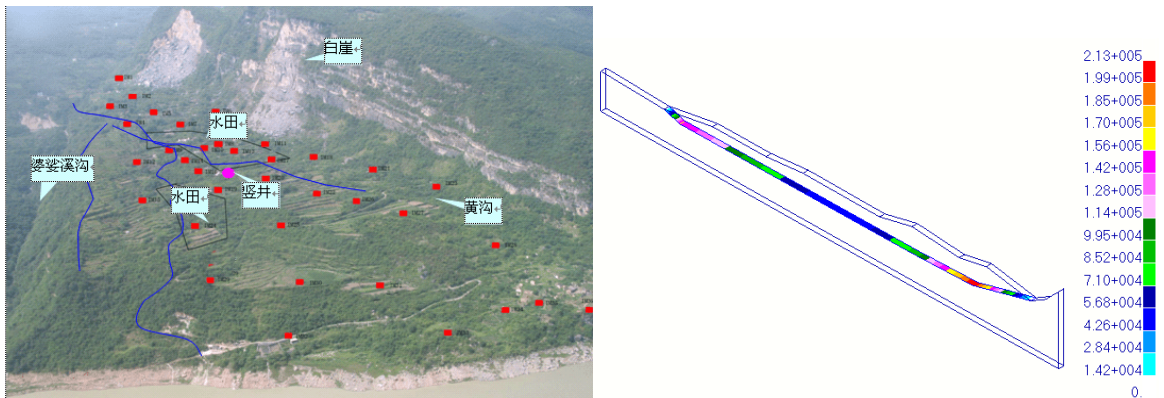


图4 茅坪滑坡等效渗透系数分析

CDEM 在采矿工程中的应用

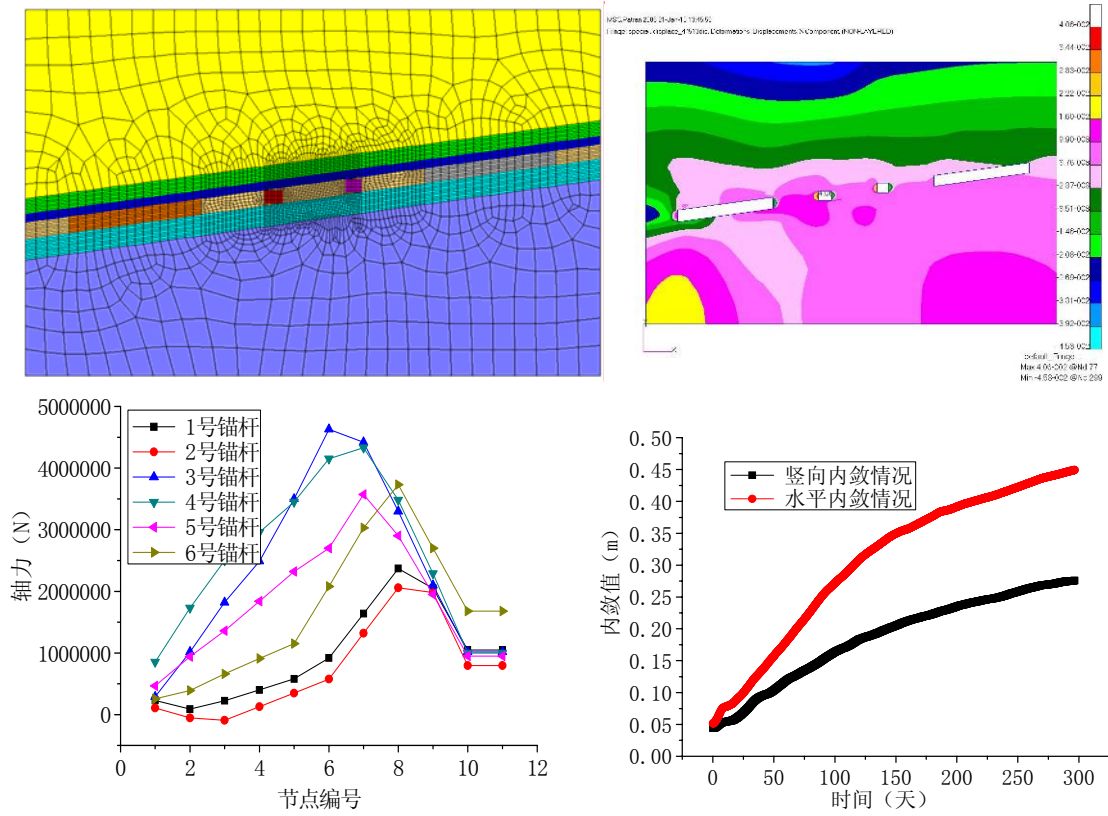


图1 煤矿巷道开挖支护中的弹塑性及蠕变计算

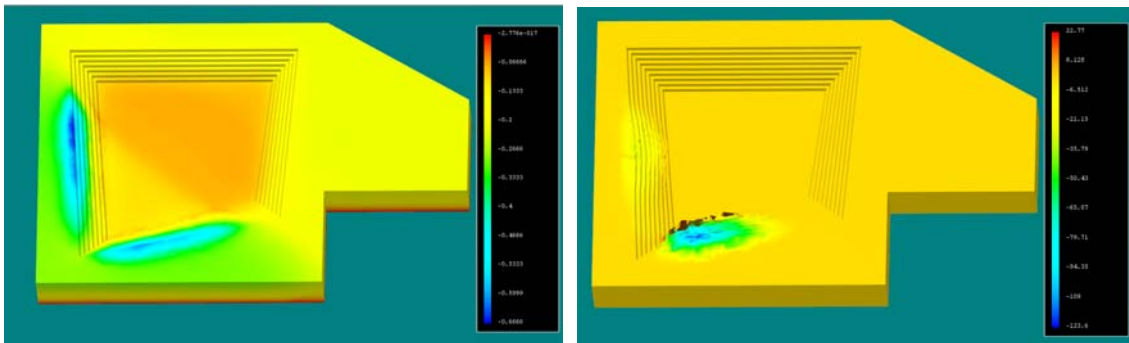


图2 露天矿开采过程中边坡失稳

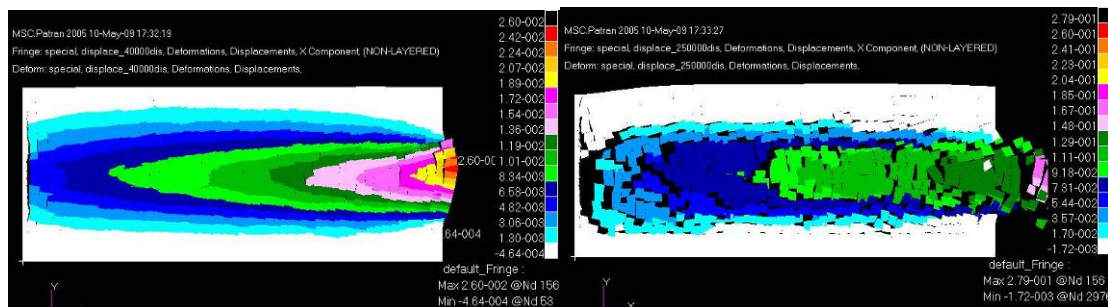


图3 煤与瓦斯突出的模拟

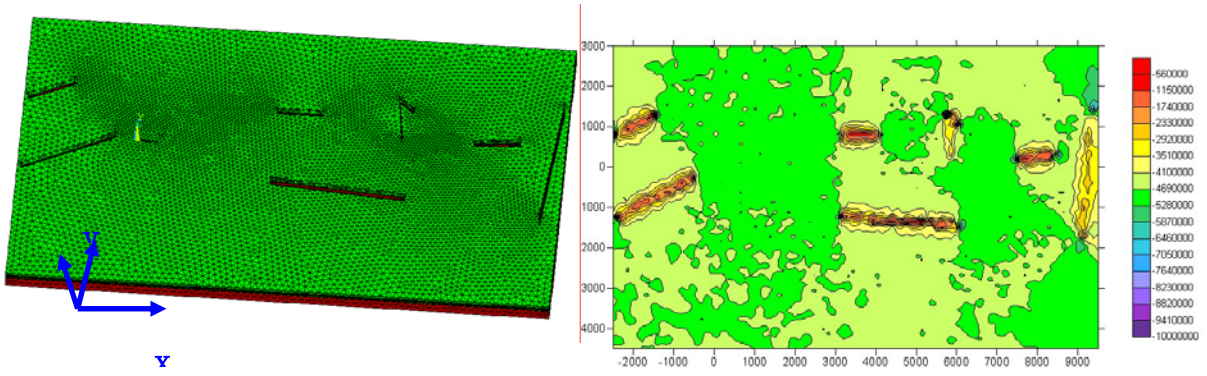


图4 山西常村煤矿断裂带对应力场的影响

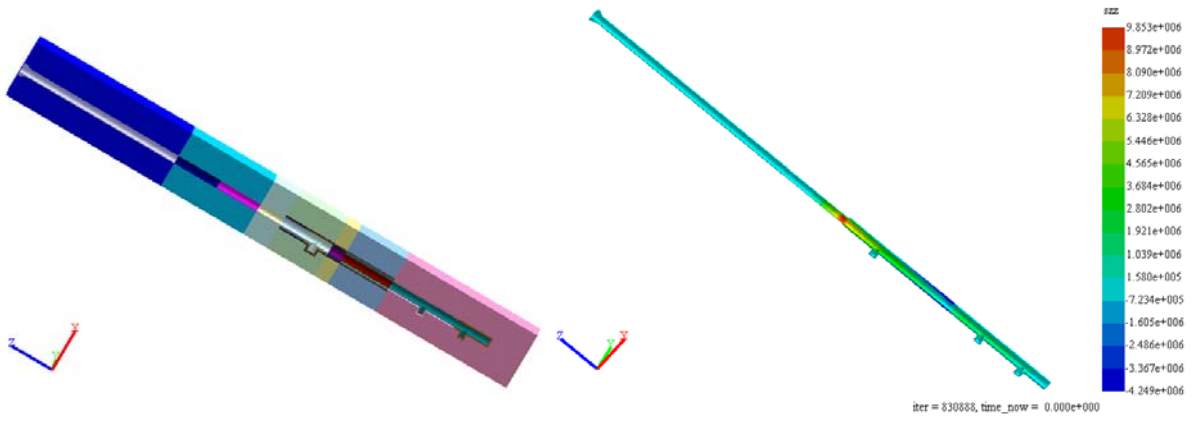


图5 矿山竖井建井全过程模拟及稳定性分析

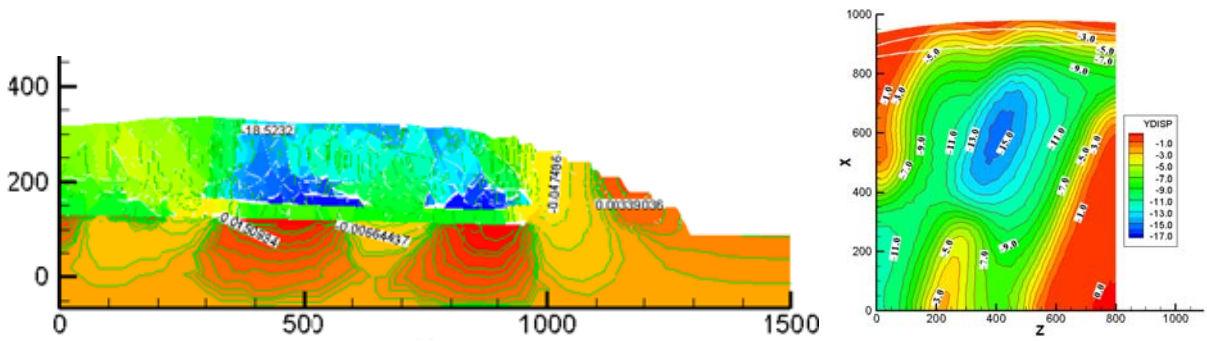


图6 露天矿开采后的剖面位移图及地表沉降等值线图

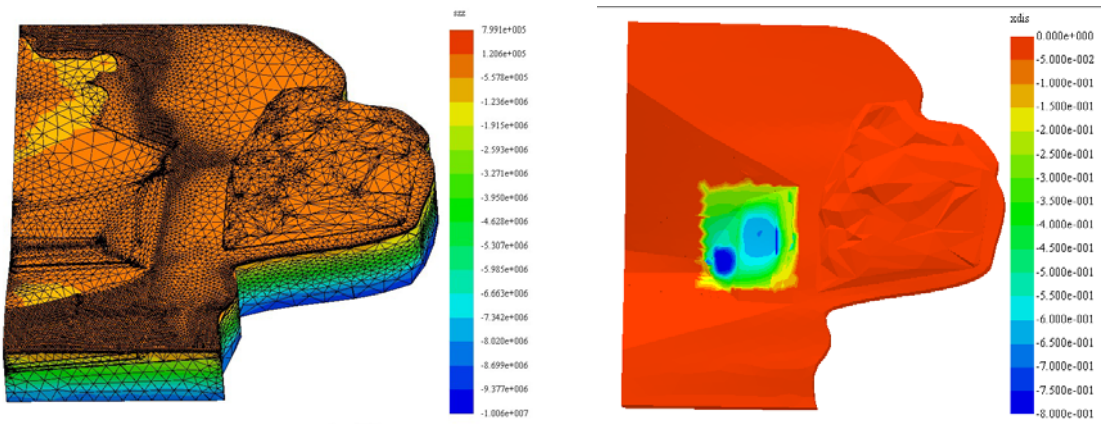


图7 露天矿边坡的稳定性分析

CDEM 在爆破工程中的应用

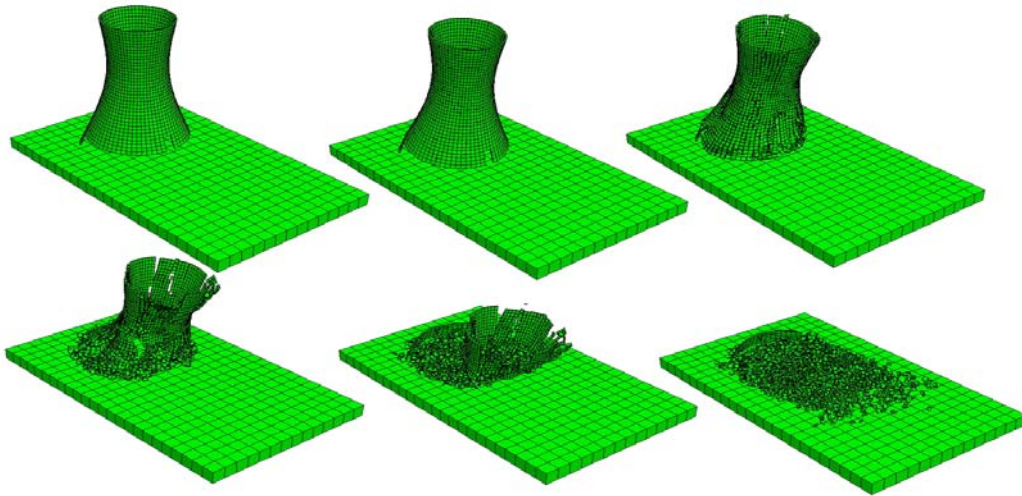


图1 冷却塔的爆破拆除模拟

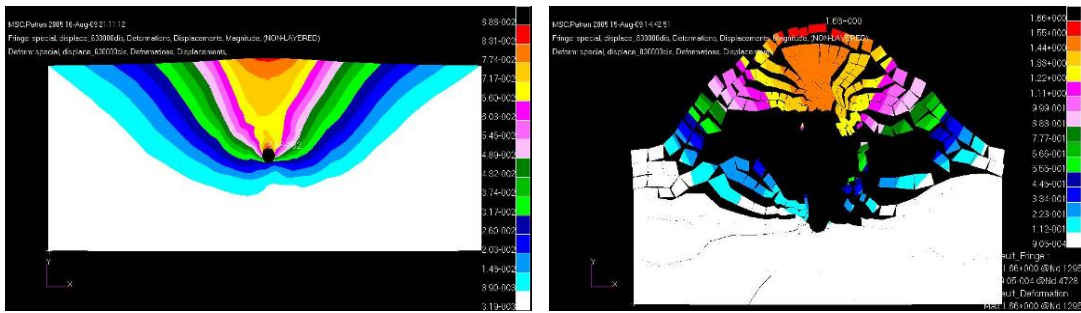


图2 完整岩体及裂隙岩体在相同炸药药量下的不同响应

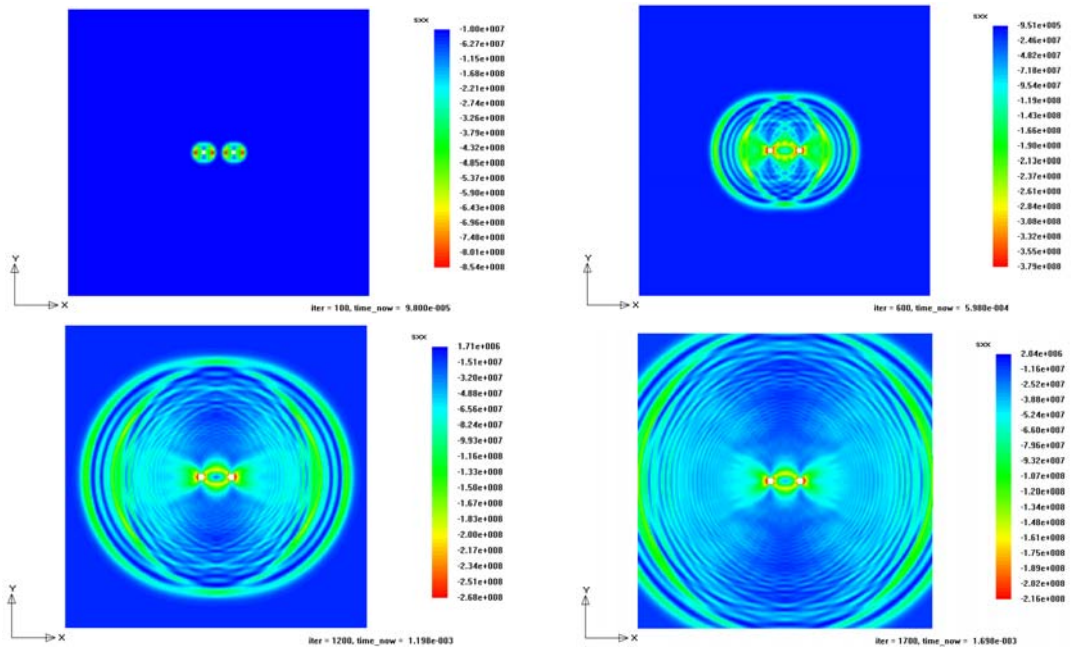


图3 高围压作用下爆破导致的应力波传播效果模拟

CDEM 在高速冲击中的应用

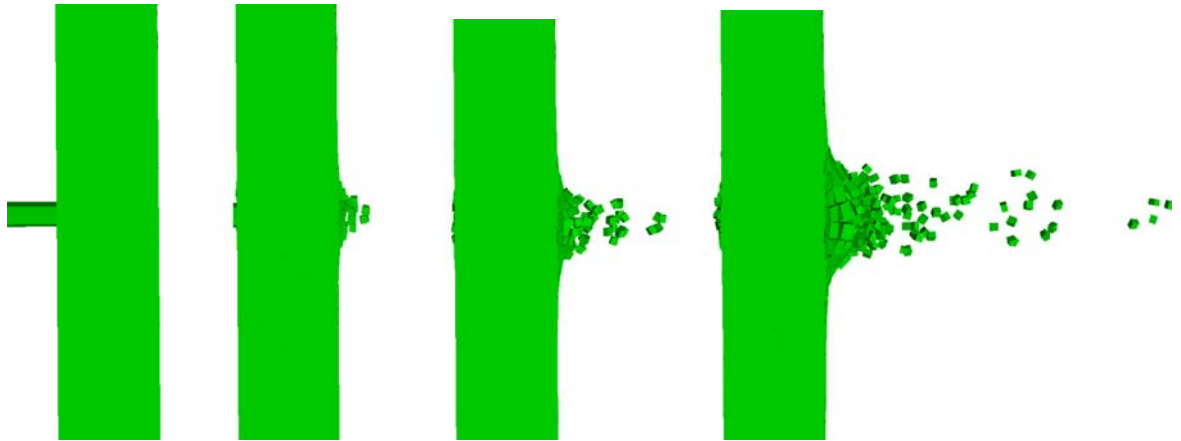


图1 100m/s 子弹冲击混凝土厚板模拟

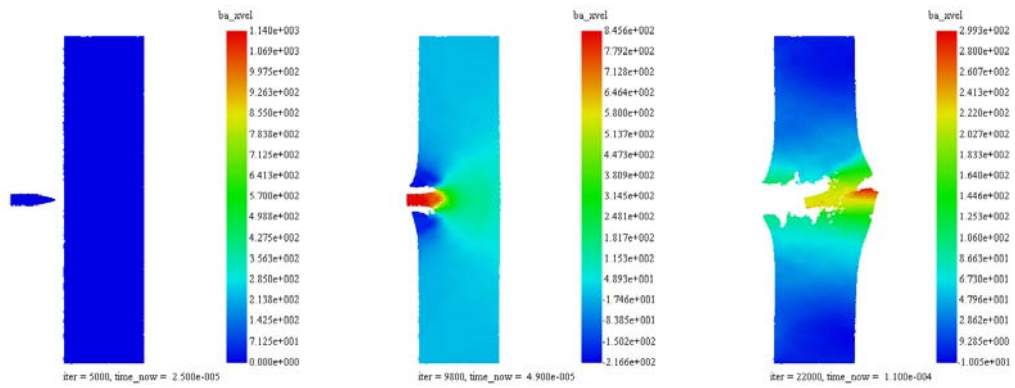


图2 流体弹塑性模型用于钨弹打击铝板的模拟

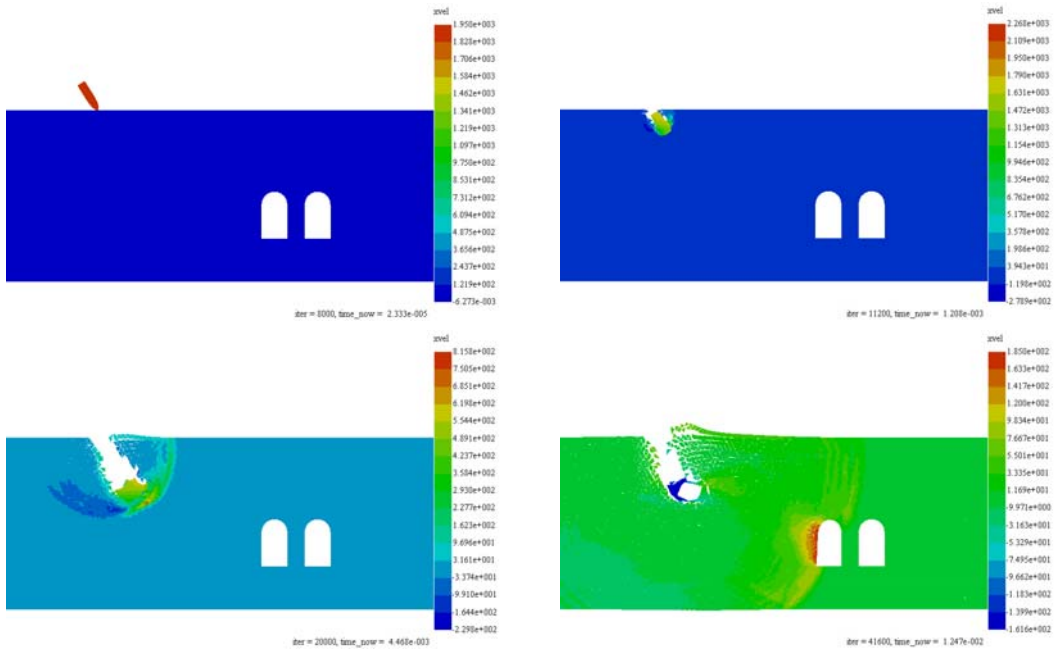


图3 3500m/s 钻地弹深部爆炸对地下结构冲击作用的模拟

CDEM 在隧道工程中的应用

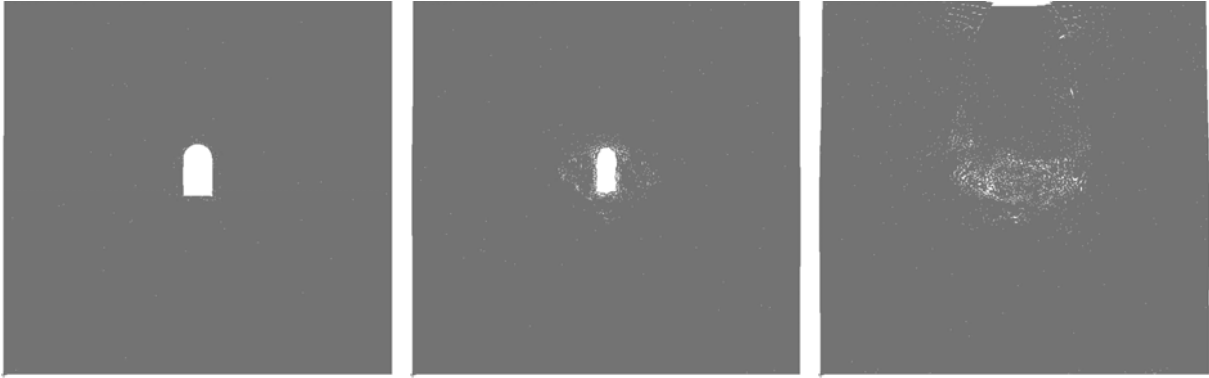


图1 碎裂岩体中隧道开挖引起的地表沉降模拟

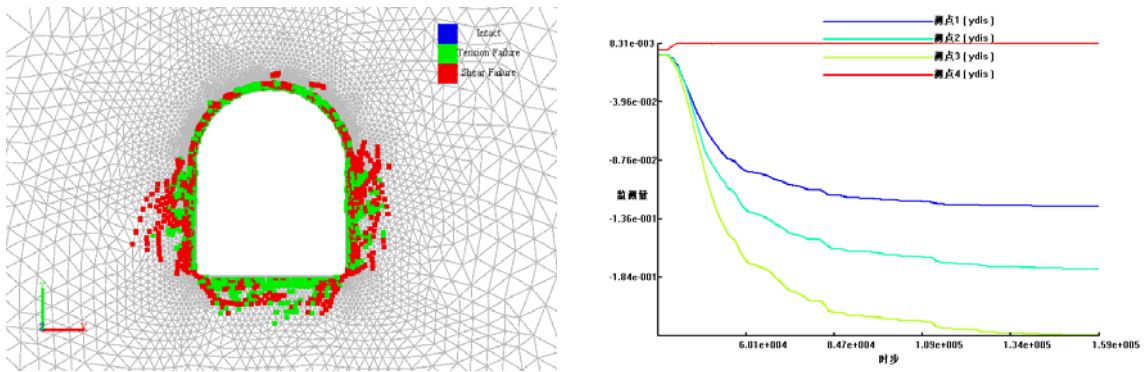


图2 隧道开挖后的破裂区域及不同位置的变形量

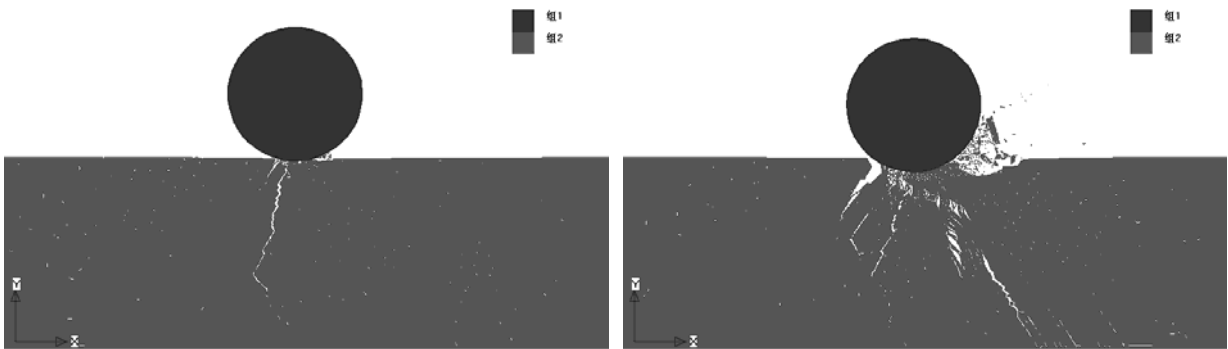


图3 TBM 滚刀破岩机理模拟

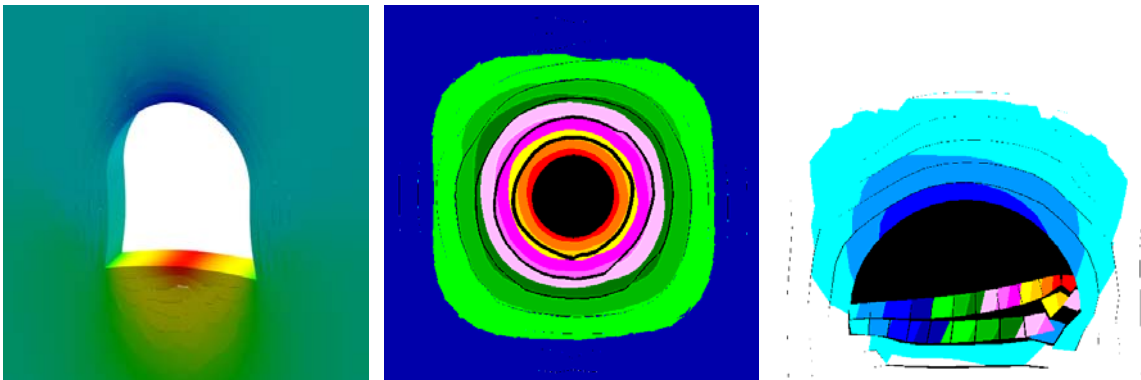


图4 巷道松动圈演化模拟

CDEM 在结构工程中的应用

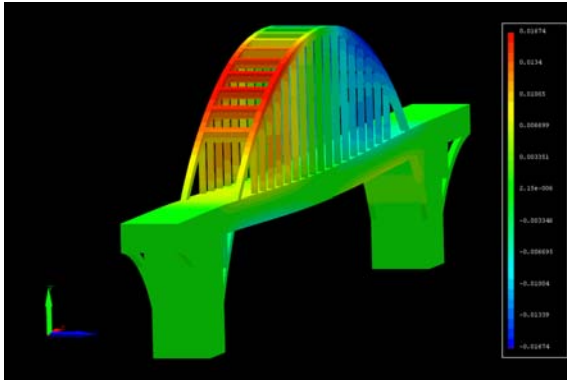


图1 地震作用下桥梁稳定性的模拟

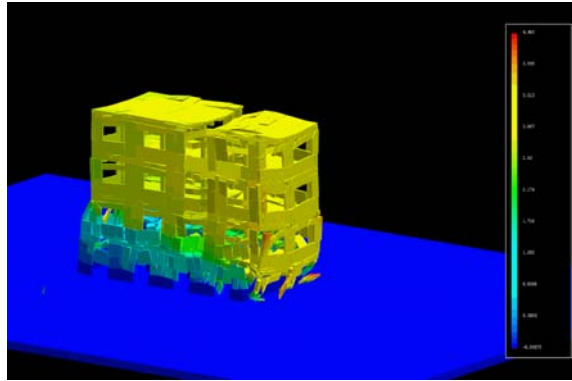


图2 地震作用下的建筑物倒塌

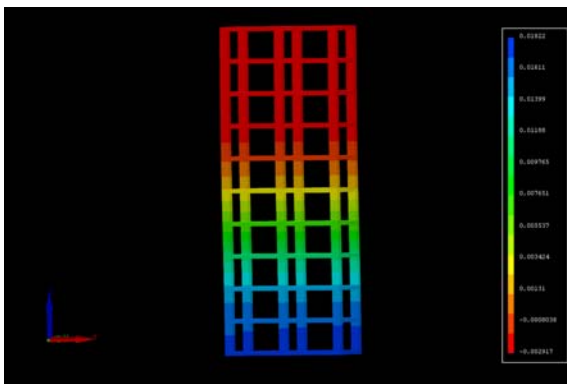


图3 地震作用下框架结构整体稳定性的模拟

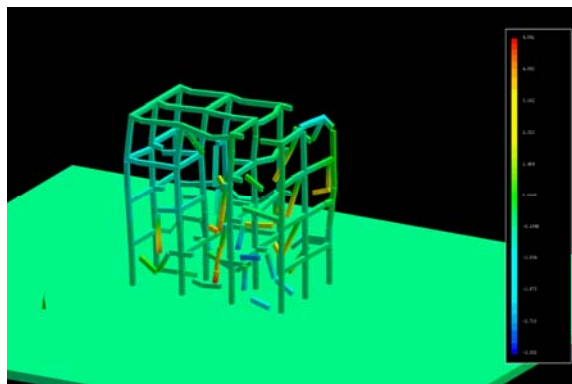


图4 地震作用下框架结构的倒塌

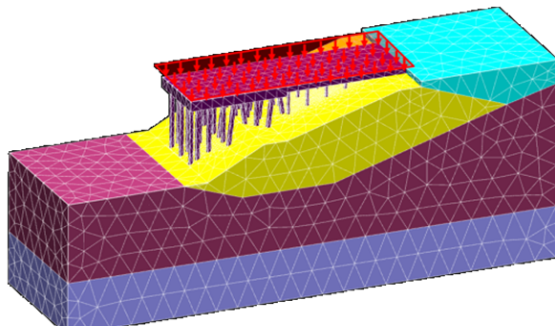


图5 高桩码头前承台受力时的位移场分析

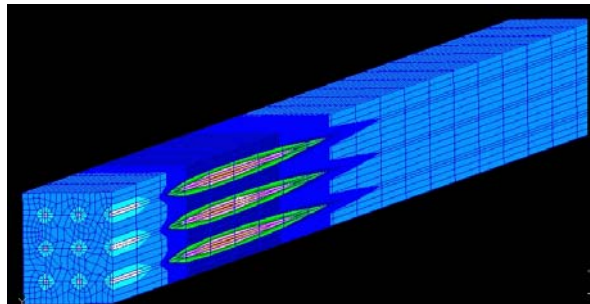
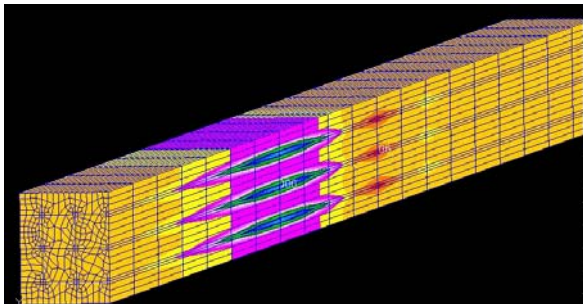
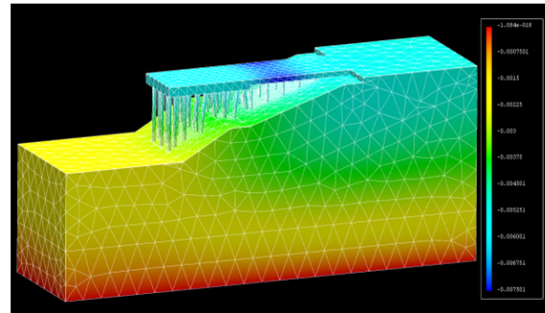


图6 应力波在钢筋混凝土中的传播模拟

CDEM 在机械工程中的应用

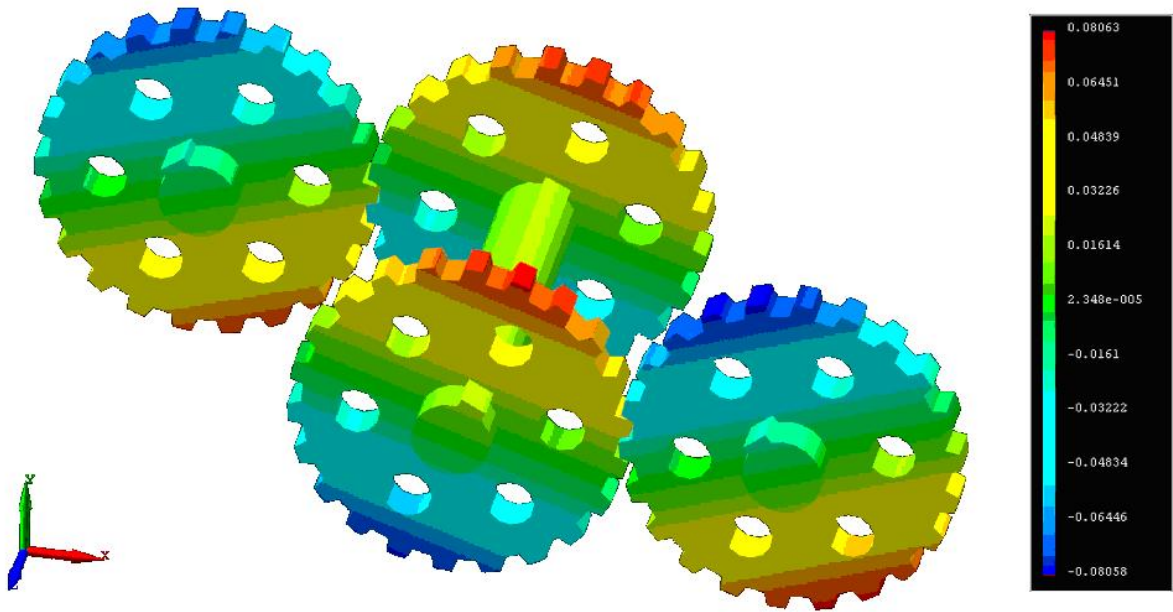


图1 CDEM 模拟齿轮的传动和转动

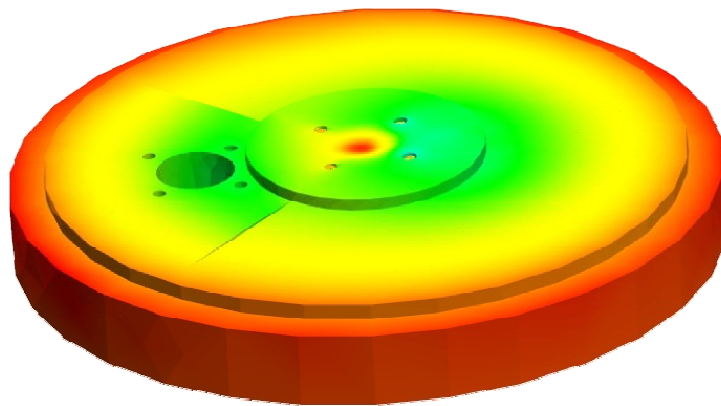


图2 空气压缩机缸盖的非线性动力学分析及优化设计

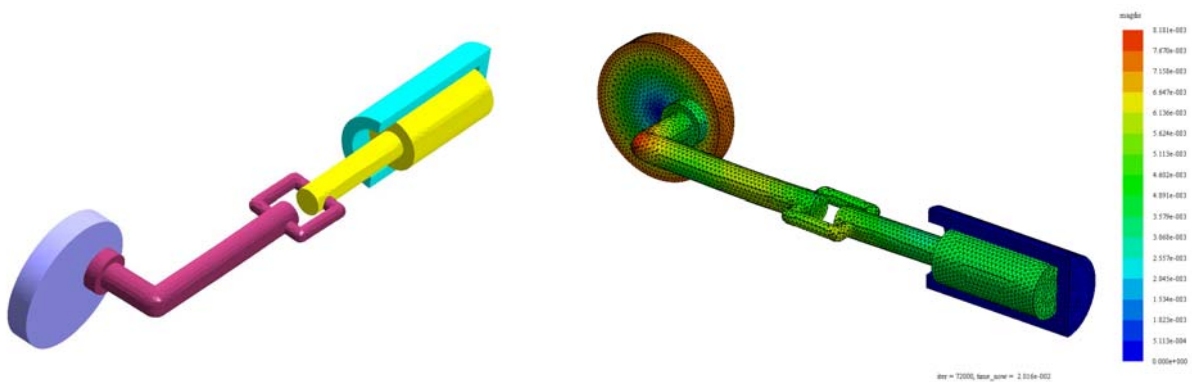


图3 CDEM 模拟偏心轮带动活塞水平运动

CDEM 在颗粒问题中的应用

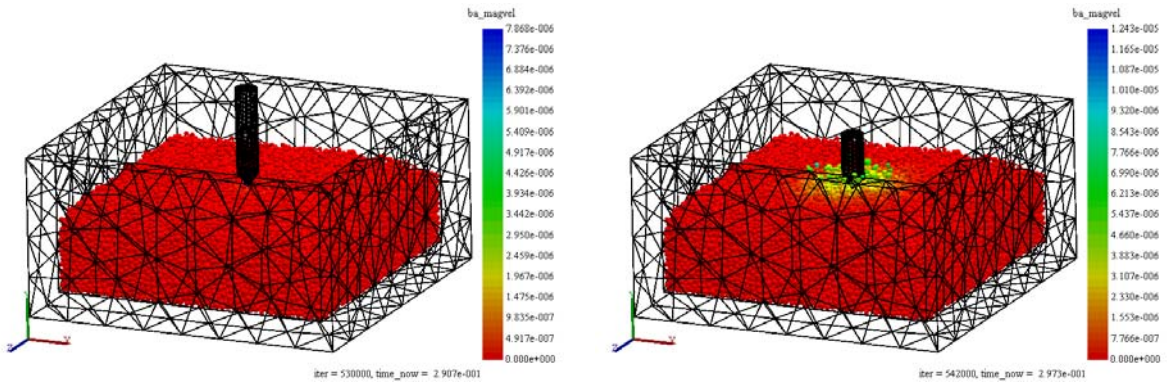


图1 颗粒流模拟岩石钻进过程

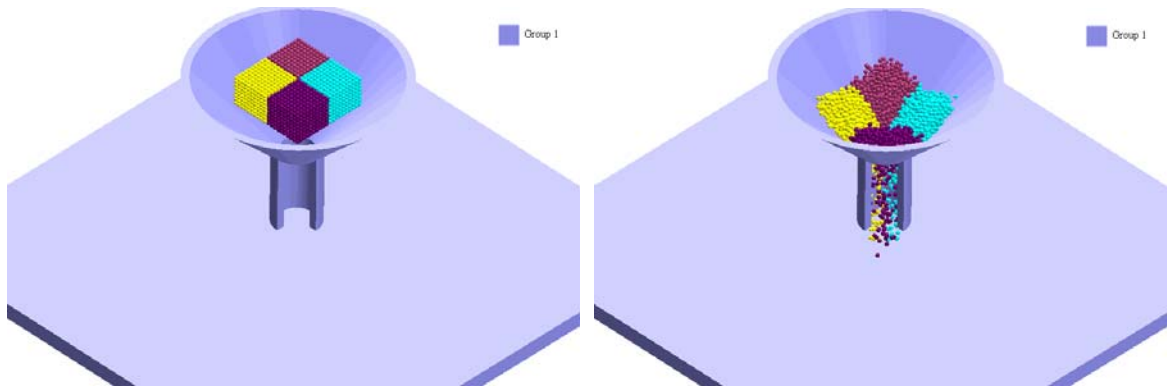


图2 CDEM 模拟颗粒材料的混合

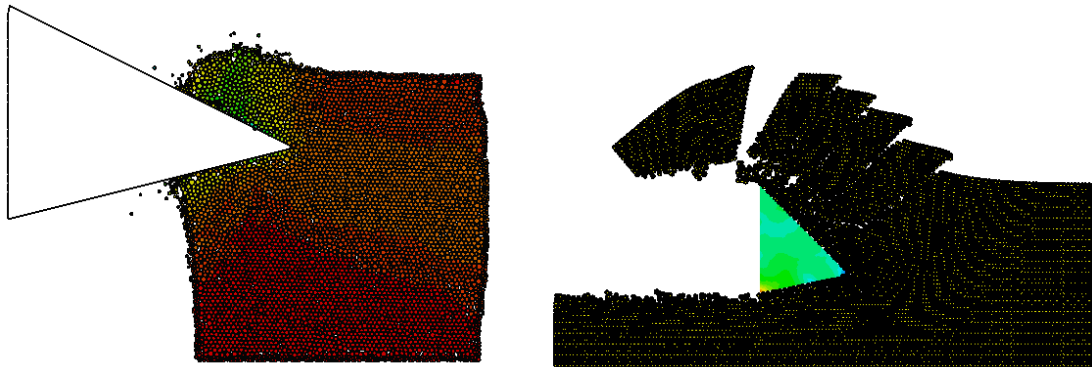


图3 CDEM 用颗粒模型模拟软土和硬岩的切割

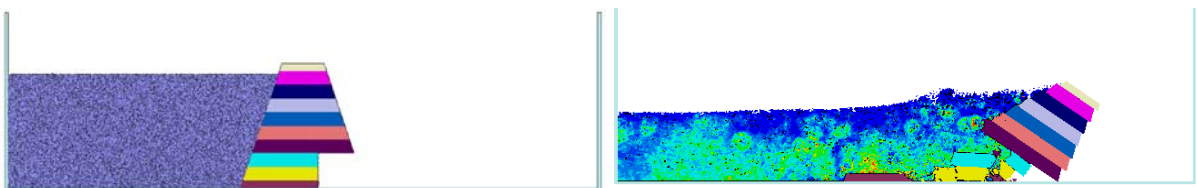


图4 坝体的拆除——用颗粒模拟水与坝的相互作用

CDEM 在流体问题中的应用

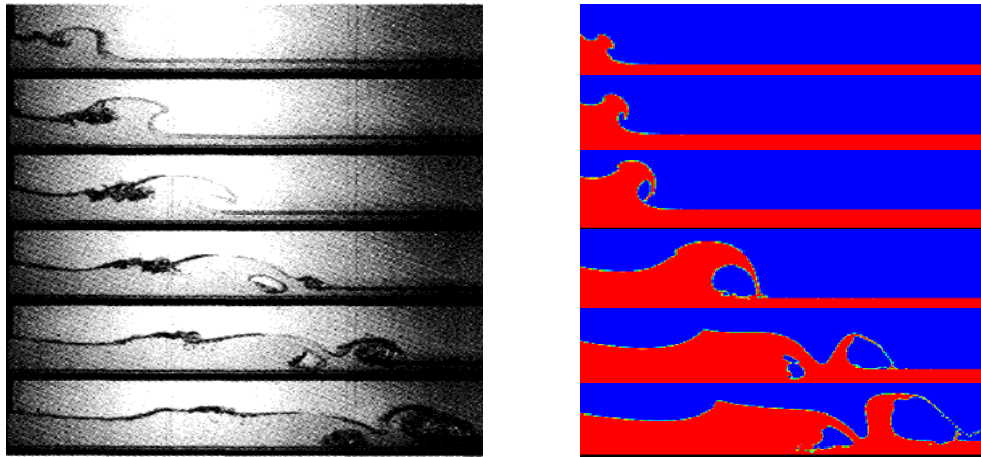


图1 溃坝后流体运移模拟

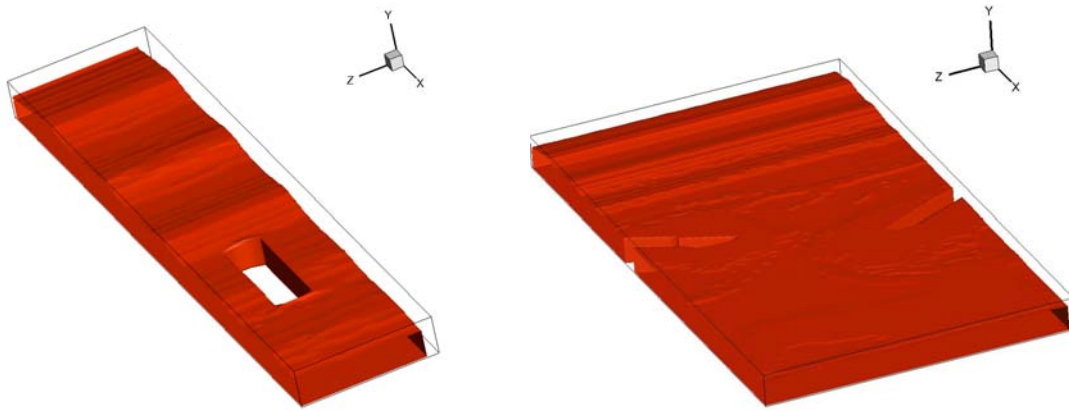


图2 三维波浪模拟

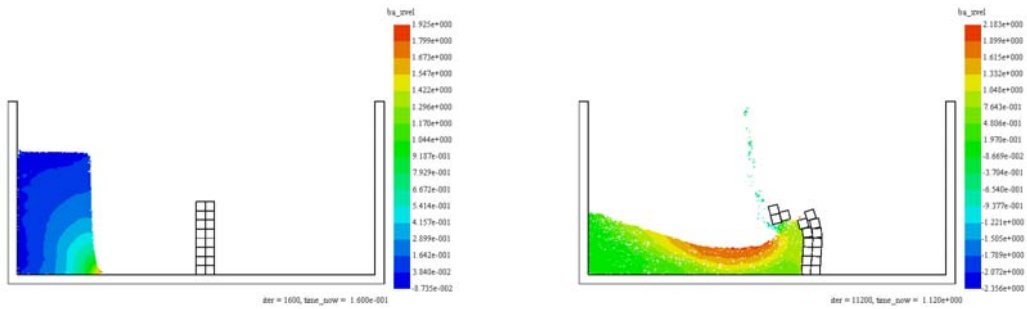


图3 流体作用下块体的倾倒模拟

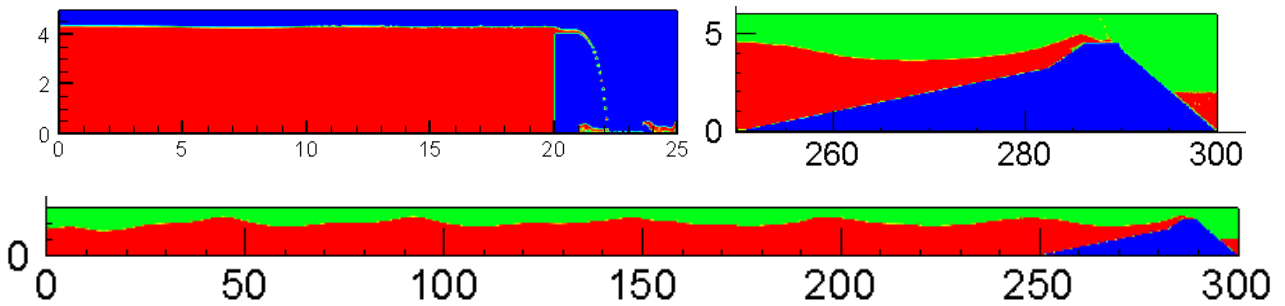


图4 防波堤越浪量的模拟

CDEM 在其他领域的应用

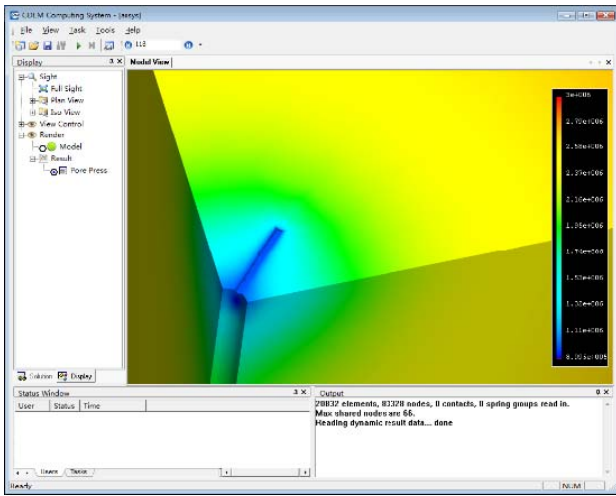


图1 石油开采射孔渗流场计算



图2 海洋平台管桩结构与海冰作用计算

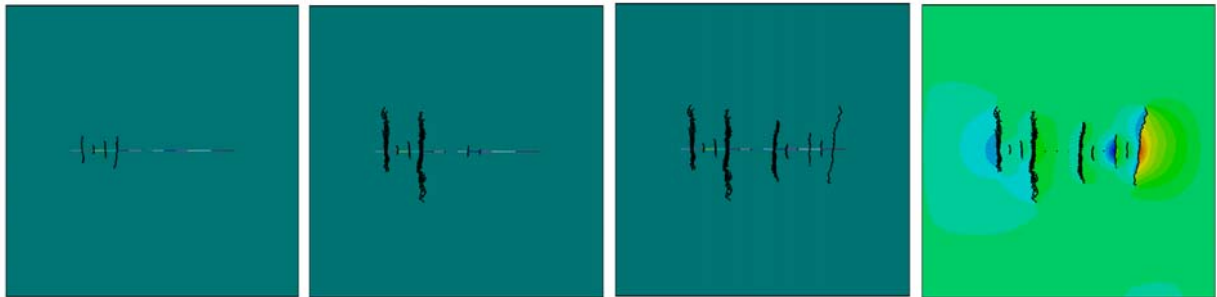


图3 页岩气井中水力压裂过程模拟

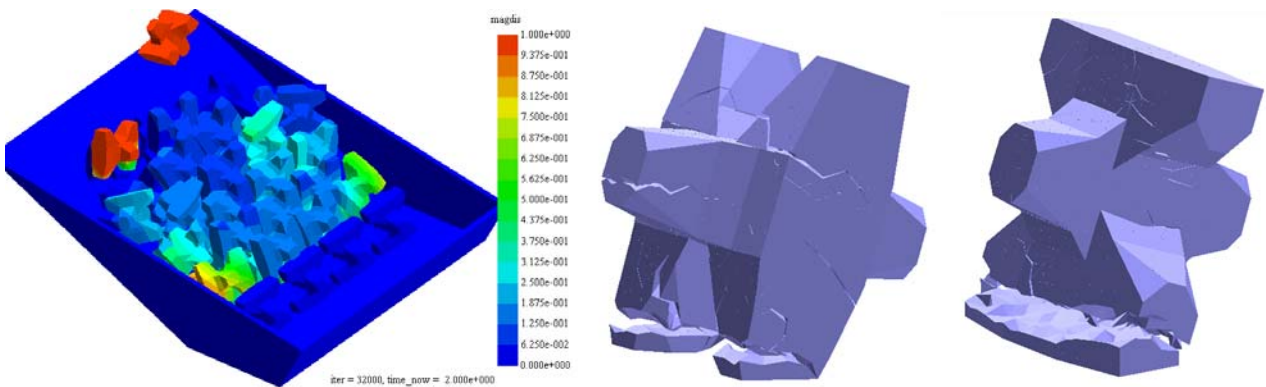


图4 海浪作用下扭王字块的失稳破坏

