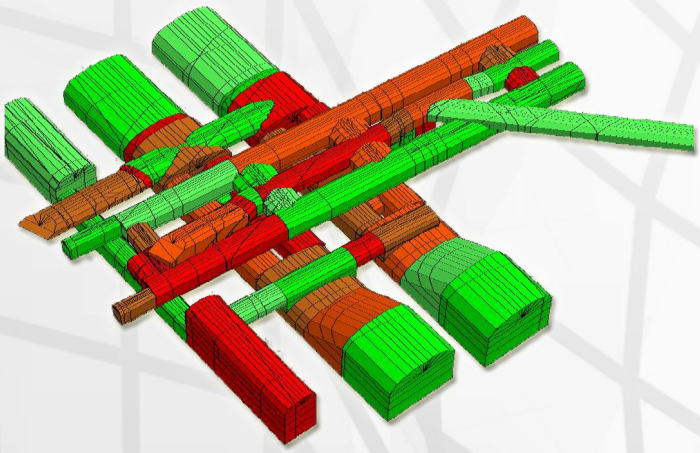
ITASCA
www.Itasca.cn

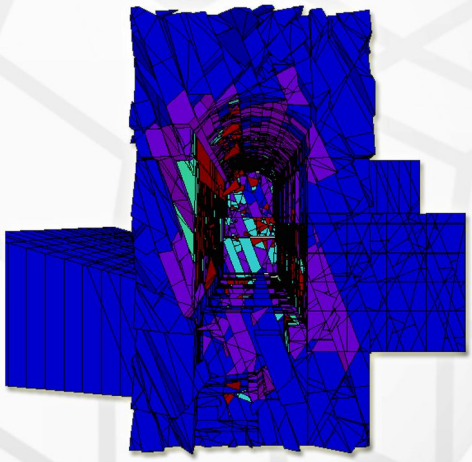
中仿科技
CnTech
www.CnTech.com.cn

GEO岩土科技
www.GeoEngin.com

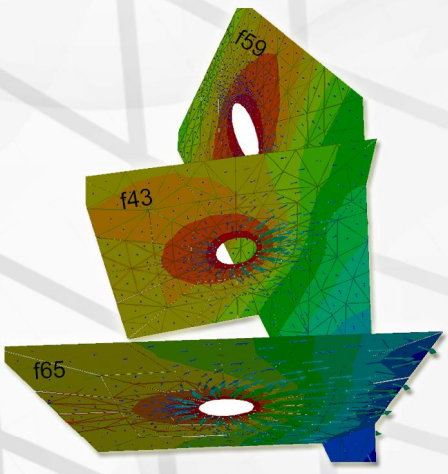
离散单元程序UDEC/3DEC

工 程 案 例 集









序　言

针对岩土体问题开发的 Itasca 数值计算软件 FLAC/FLAC3D、UDEC/3DEC、PFC2D/PFC3D 无疑赢得了国际范围内最广泛的首肯，已经成为全世界范围内岩土体领域覆盖面最广、用户最多的软件产品，在科学研究和生产实践环节越来越发挥重要的作用。

Itasca 软件的开发最早要追溯到 1971 年 Peter Cundall 院士提出离散元的概念，80 年代初，Itasca 推出的第一款商业化数值计算软件为 UDEC，此后才陆续发展了其他数值计算软件。

作为一家以解决超常规工程问题为主的高端技术咨询机构，遍布世界五大洲共 12 个国家的 Itasca 咨询专家和工程师也是 Itasca 软件最忠实的用户，在几十年日复一日地应用这些软件解决复杂现实工程问题的同时，也在应用环节积累了独到的心得和体会，成为 Itasca 标志性技术特长之一。

相对于 FLAC/FLAC3D 而言，中国岩土工程界或许对非连续方法程序 UDEC/3DEC、以及 PFC2D/PFC3D 的认识还不是很深入，学术界对非连续方法的成熟性可能还存在一些疑虑。事实上，自 80 年代起，Itasca 专家已越来越广泛地采用非连续方法程序解决复杂的实际工程问题。鉴于这种情况，我们汇总了 UDEC/3DEC 的一些应用实例，分别从模型几何构建、计算策略、特定专题、成果解译等几个环节比较系统地介绍了在 Itasca 内部完成的一些成果。其中的大多数实例来自中国，也出自 Itasca 中国公司技术人员之手，更贴近中国现实地介绍一些具有世界水平的应用成果。

实现数值计算工程应用是已经存在的客观现实，实现数值计算工程应用需要丰富的积累，理解并合理选择程序就是基础性环节之一。我们希望这些实例介绍能帮助数值计算人员更全面地认识 UDEC/3DEC 程序，更希望通过更合理地选择和运用程序促进数值计算工程应用整体水平的提高。

编者：朱焕春、孟国涛

几何篇之案例一：地下工程规则几何形态的模拟

问题的提出:水电站、交通、地下实验场等领域的生产和科研工作中地下建筑物的特点是形态规则但结构复杂,对这些规则且形态复杂地下结构洞室群的模拟是数值计算的基础。

解决方案：在领悟 3DEC 中少数几个命令（如 POLY、JSET）以后，建模工作即形同搭积木游戏一般充满乐趣和挑战性，几乎完全依赖于建模人员的把握。

实例一：大型复杂地下厂房洞室群形态的精确模拟（孟国涛，2008）

图 1 为 9 机 9 洞从左到右包括引水洞群、发电厂房、母线洞、主变室、尾水调压室、和尾水洞的 3DEC 模型。

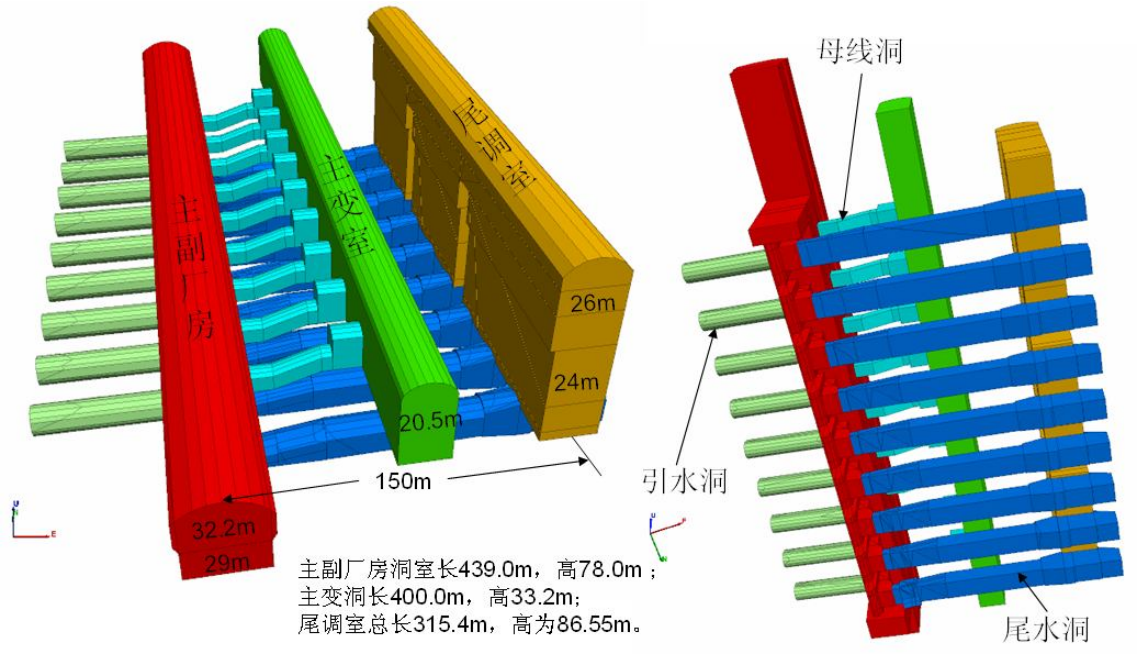


图 1：大型地下厂房洞室群的精确模拟

精度：与设计形态的最大误差控制在 0.05m 以内，完全满足岩体工程数值计算对几何尺寸的精度要求。

效率：建立该模型的实际耗时为 24 小时，即 3 个工作日。

技术关键点：

1） 建模思路：分块拼装是效率、精度、整洁的基本保证；

2） 利用 FISH 重复规则部分和相似部分，可极大地提高效率。

实例二：两个大型复杂地下厂房洞室群形态的精确模拟（朱焕春，2005）

某水电站布置两个邻近的地下厂房洞室群，设计中除需要研究地下厂房开挖的稳定性以外，还需要保证两个厂房洞室群之间不存在干扰，即一个模型需要同时包括两个地下厂房。

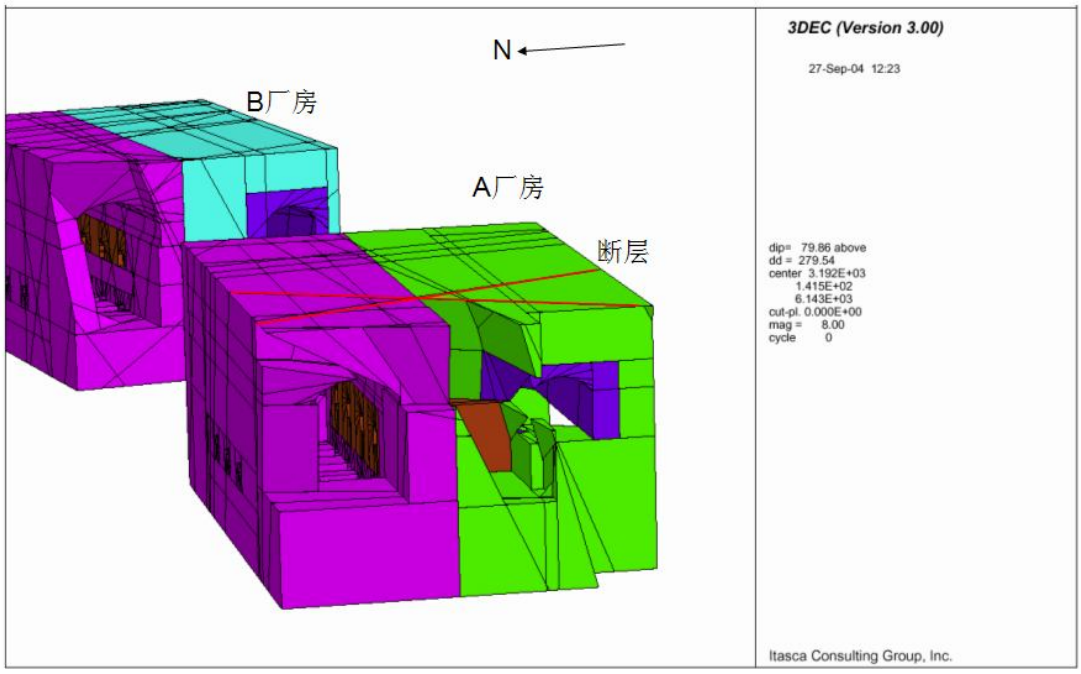


图 2：一个 3DEC 模型中准确模拟两个地下厂房洞室群及岩体断层

采用与实例一相同的建模思路和技巧建立的模型如图 2 所示，与实例一不一致地，本例中隐藏建筑物而显示了建筑物周边的围岩、以及围岩中发育的断层和长大结构面。

技术关键：保证模型精度条件下最大限度地保持模型清晰整洁，对 3DEC 建模技术的灵活把握能力是关键。

完成该模型的实际耗时：4 天，即 32 小时。

几何篇之案例二：复杂地表形态的模拟

问题的提出：目前中国西部水电站建设中普遍遇到大型自然高边坡的稳定问题，边坡高度可以达到千米的量级，且形态复杂，而边坡稳定性分析中需要特别突出边坡地形形态特征。

解决途径：利用 3DEC 强大且灵活的前处理手段、视问题的具体特点确定不同的建模思路，突出问题。从某个角度上讲，建模并不是简单地对几何形态的再现，而是根据研究目的采取最有效的手段把握问题的主要方面。

实例一：自然边坡凸起山梁的模拟（李浩，2005）

工程背景：某深切河谷自然岸坡形态复杂，边坡面上凸起的山梁稳定性成为工程建设中关心的重点问题之一，需要展开专门的研究工作。

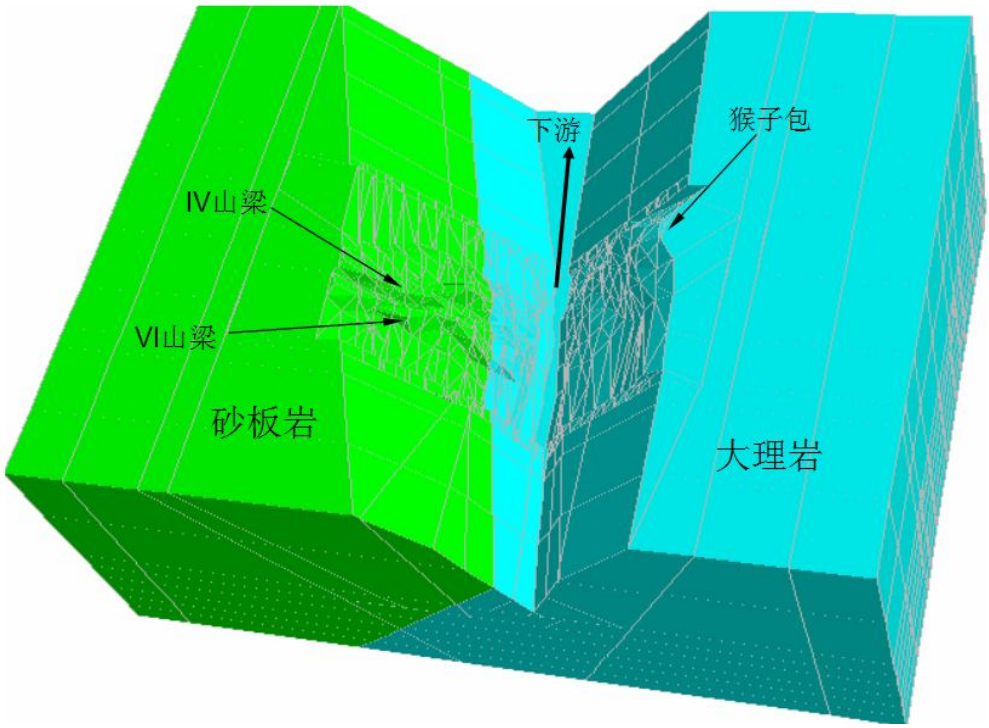


图 3：复杂山梁形态的模拟

解决途径：采用 3DEC 建立的模型如图 3 所示，该模型长宽均达到 3km 以上的量级，中间部位包括了研究区域的山梁形态，这一部分采用 PGen 建模，而外围在 Outbox 基础上改造而成，提高建模工作效率。

效率：该模型的实际耗时为 3 天，即 24 小时。

实例二：结构面控制型边坡的稳定分析（朱焕春，2008）

工程背景：某自然边坡由相对坚硬的火山岩组成，定位的缓倾结构面对边坡稳定起控制作用，边坡具体的破坏模式如整体滑移或解体、以及潜在解体破坏的区域范围与边坡体内随机结构面的响应密切相关，成为研究重点之一。

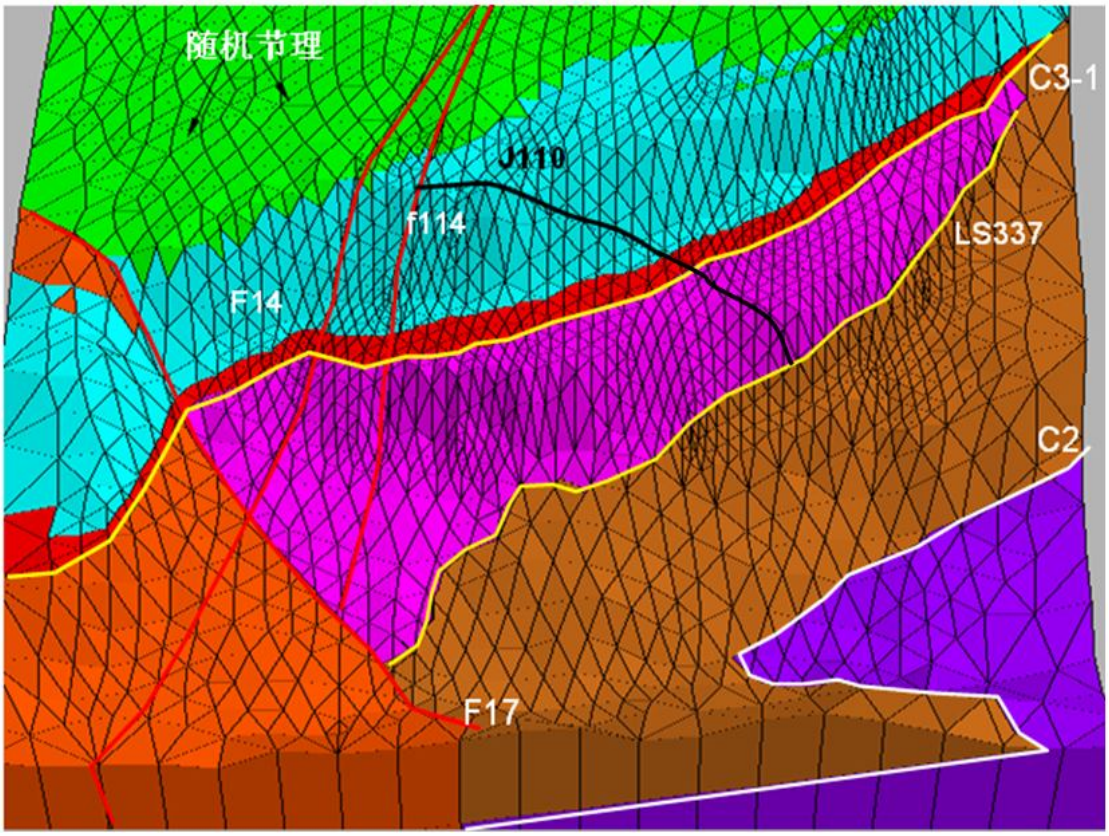


图 4：在模拟主要定位结构面基础上体现随机结构面作用的边坡模型

解决途径：采用 3DEC 建立的模型如图 4 所示，由于缺乏现场结构面统计分布特征，建模时采取了一种新的思路：即给出非常随机的节理分布，研究大型定位结构面变形时不同方位节理的响应方式和程度。实际操作中直接利用地表三角网模型采用 FISH 建模，保证了主要区域节理发育密度，更好地实现计算目标。模型中包含足够多的节理以后，控制性大规模结构面的滑动变形导致其上部岩体中节理的变形方式（张开、剪切）和影响区域可以得到反映，实现研究目的。

效率：编写和完成 FISH、利用 FISH 完成模型的实际耗时约 1 小时，修改和重新建立模型仅耗时数分钟。

实例三：复杂自然边坡的开挖模拟（朱焕春，2009）

工程背景：因工程边坡在复杂的高陡自然变形基础上开挖而成，工程边坡的变形受到自然边坡和开挖边坡形态等几何因素的影响，研究工作需要比较准确地模拟自然和人工边坡的形态特征，从而准确地反映开挖过程中的荷载变化和主要结构面临空条件的变化。

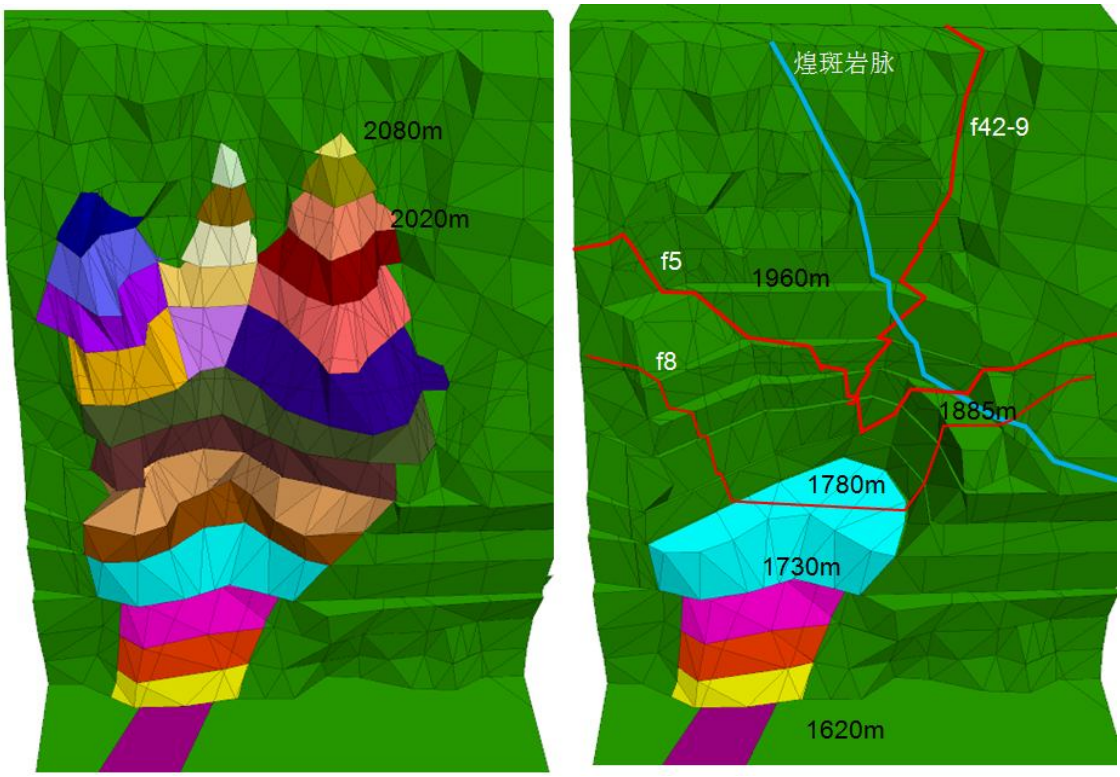


图 5：复杂自然地表和开挖面形态边坡的模拟

解决途径：采用 3DEC 建立的模型如图 5 所示，最重要的工作是根据问题的特点确定建模思路。实际工作中以 PGen 为基础采用了三种不同方式组合建模的方式。图 5 左表示了自然边坡形态和待开挖区域形态，右图则显示了开挖到一定程度以后人工边坡的形态，断层组合块体在开挖边坡上的出露状态得到了良好反映。

关键技术：确定模型需要反映的重点内容和根据这些重点确定建模思路是最关键的环节，也是建立复杂模型时需要遵守的原则。

效率：在确定工作思路以后，从 AutoCAD 图形到建立 3DEC 模型的总耗时为 3 个工作日。

几何篇之案例三：地表和地下结合复杂形态的模拟

问题的提出：水电工程中进水口建筑物包括自然边坡、开挖边坡、引水洞、引水闸室等，涉及地表和地下两个部分，复杂程度高。矿山开采中经常遇到地表转地下的问题，这涉及到同时对地表露天边坡和地下采场几何形态的模拟，更复杂地，一些矿山历史上曾进行过局部矿体开采，在边坡体内留下很多采空区。

解决方案：往往以 3DEC 全三维图形建模工具 PGen 为基本工具，根据问题的具体特点结合 3DEC 命令流建模方式。

实例一：水电站进水口边坡和建筑物的模拟（朱焕春，2006）

工程背景：某水电站进水口布置在陡峭的河谷岸坡坡下部，工程建设需要对自然边坡坡脚进行开挖，同时在坡体内部还将进行引水洞和闸门井开挖，在自然边坡的敏感地带进行的表面和地下开挖是工程设计中关心的问题之一，研究工作需要同时考虑自然边坡、地表和地下开挖形成的几何形态。

关键技术：以 3DEC 建模模块 PGen 为基本手段，与 3DEC 命令流结合的方式建模。建模过程中采取了多种技巧，保证模型的简捷，体现了对程序的驾驭能力。

实际耗时：3 天

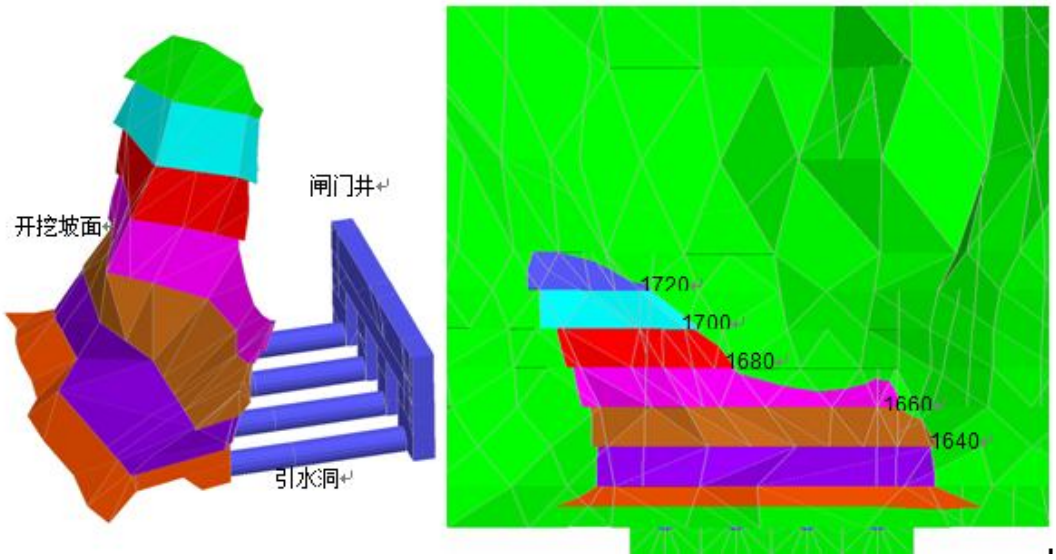


图 6：复杂自然地表和地下建筑物结合的模拟

实例二：含大量局部采空区的地表转地下开采（李浩，2008）

工程背景：某矿山工程历史上先完成了露天开采，由于市场价格原因，历史上对边坡内 80 余处小型高品位矿脉进行了开采，形成大量的采空区。随着近年来国际上矿石价格的走高，工程中需要进行论证矿体全面回采的方案，而历史采空区对开采安全的影响显然尤为重要，建立复杂的数值计算模型是数值论证的基础。

关键技术：这或许是世界上迄今为止几何形态最复杂的 3DEC 模型（图 7），模型不仅需要考虑以前开采的露天边坡形态，还需要考虑遍布边坡体内零星开采的采空区、以及未来开采的规划方案，几何复杂性直接决定了计算稳定性，因此，对 3DEC 的高度理解和驾驭能力成为关键，从某种程度上讲，建模过程中采取的每一个操作都需要考虑到其岩石力学意义和对计算可能造成的影响，建模过程展现了“行家出手”的风范。

实际耗时：10 天

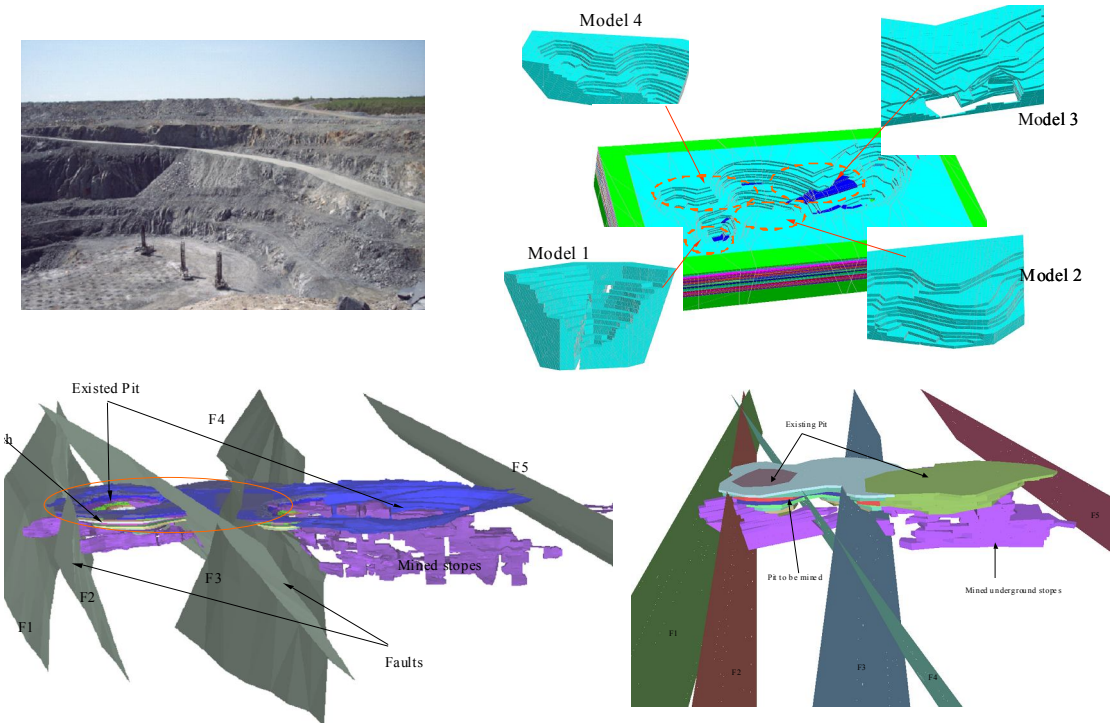


图 7：复杂大型矿坑边坡和地下开采结合的模拟

分析篇之案例一：连续非线性分析

问题的提出：深埋地下工程围岩非线性特征往往非常突出，是一些数值分析中需要考虑的核心，此时如果使用 UDEC 和/或 3DEC 软件时，需要特别强调对岩体非线性的模拟能力。

实例一：某深埋隧洞贯通前岩爆预测（朱焕春，2008）

工程背景：某相向掘进的深埋隧洞在超过 2200m 埋深部位实现贯通，贯通前两个掌子面不断逼近时若出现明显的高应力叠加现象，则很可能使得围岩应力条件满足岩爆的应力准则，存在岩爆风险。

解决途径：采用 3DEC、利用其连续非线性模拟功能正确反映深埋围岩屈服后的非线性力学特征，即应力—应变关系中的峰值后力学行为，它同样决定了屈服区范围大小和应力集中区的影响深度。

成果与验证：模拟了围岩屈服后非线性力学行为的计算成果如图 8 所示，当两个掌子面相距 40—45m 之间时出现明显的高应力叠加现象，结合其他判据做出了隧洞贯通前存在严重岩爆的预警，并制定了相应的强岩爆条件下施工作业技术要求，且要求在掌子面相距 50m 时启用。实践中采用了该作业要求，当掌子面相距 40 余米时，现场开始出现强烈岩爆。

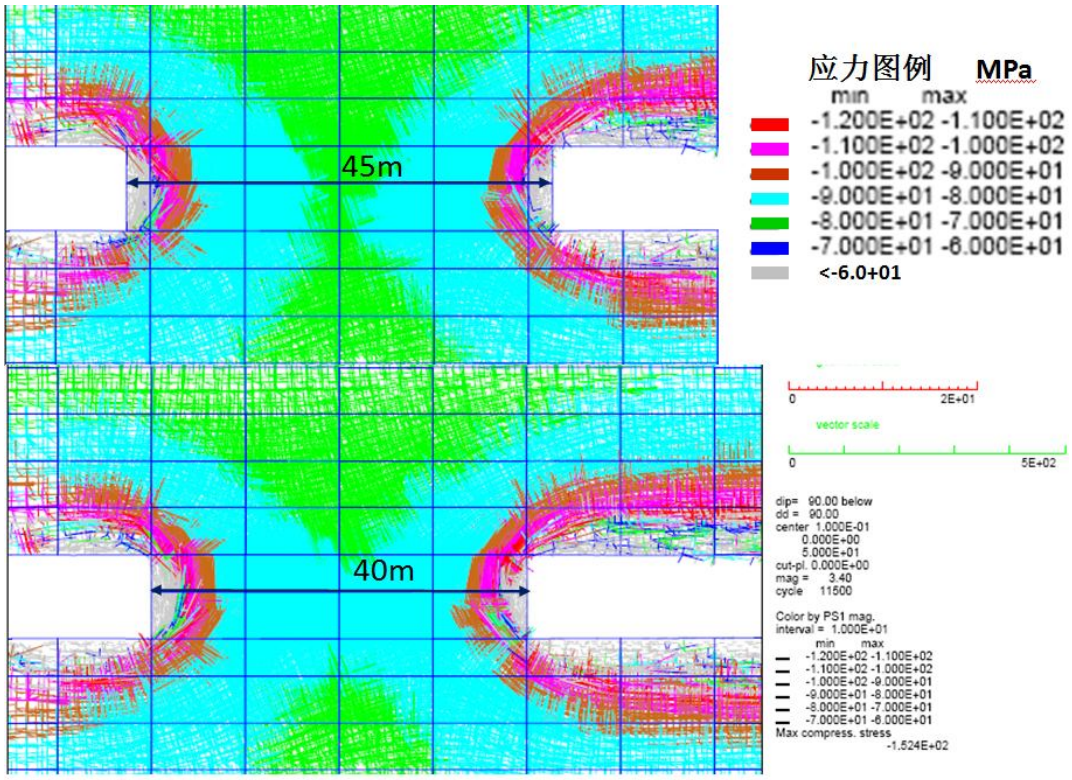


图 8：深埋隧洞岩体非线性决定的屈服区和应力集中 3DEC 计算结果

实例二：深埋脆性围岩的 V 形破坏（朱永生，2009）

工程背景：某脆性火山岩地区不同方位的勘探平洞中普遍存在高应力片帮破坏，破坏面形态呈 V 形，体现了完整脆性岩体高应力破坏特点。研究工作采用了通过“数值复制”破坏现象来把握岩体非线性特征参数的思路，即首先获得对岩体“脆性”特征的力学描述。

技术关键：V 形破坏是深埋脆性岩体高应力破坏的典型标志，直到几年前人们才根据加拿大 URL 对岩体脆性破坏 CWFS（粘结弱化、摩擦强化）机理实现 V 形破坏的数值模拟，不过，建立在这种机理基础上数值模拟时采用的力学参数与历史经验认识相去甚远，目前还缺乏工程应用基础。本次研究中对围岩峰值强度采用传统的经验值，注意了岩体非线性段描述过程中潜在的尺寸效应问题，获得的结果如图 9 所示。

成果叙述：研究工作采用 UDEC 程序，鉴于现场存在的刚性层面对片帮破坏可能存在的影响，图 9 左和中分别表示了不考虑和考虑特定结构面对片帮破坏的影响，论证了与最大主应力方位近平行勘探洞的强片帮坑属于结构面控制型高应力破坏，不足以作为判断初始地应力场特征和岩体非线性特征的现实依据。计算结果显示片帮区的破坏性质为张破坏，这与监测成果的解译和人们对于片帮破坏机理的认识相符，证明了 UDEC 在精细描述岩体非线性特征、再现现场破坏现象方面的杰出能力。

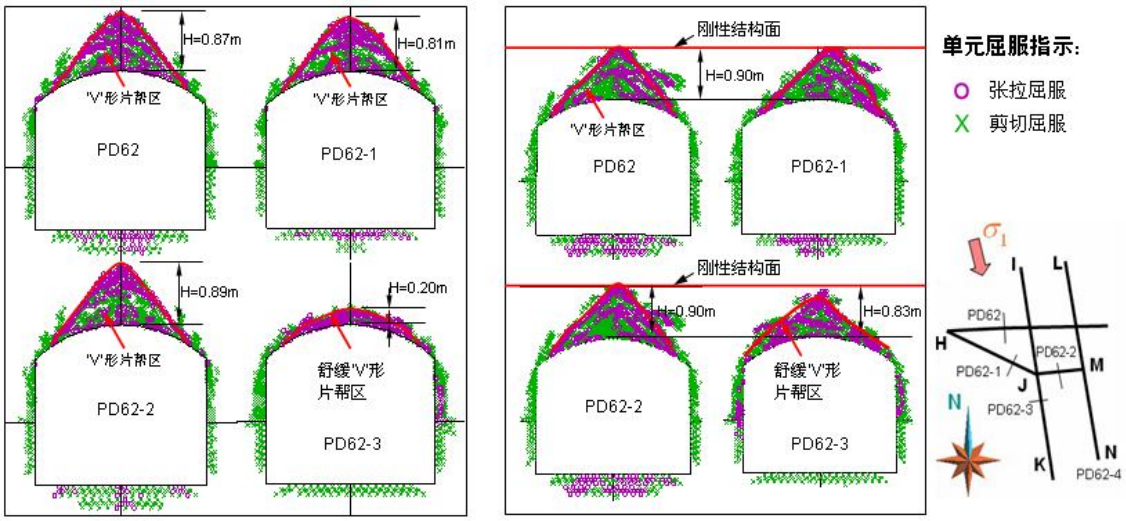


图 9：不同方位勘探洞中 V 形破坏程度的数值再现

实例三：不同围压条件下围岩力学特性的转换（朱永生、褚卫江，2009）

工程背景：深埋地下工程建设中遇到的一些中等坚硬岩体可以具有比较复杂的力学特性，在工程荷载水平下围压条件对岩体力学性质的影响可以非常突出，表现为在低围压条件下呈脆性特征为主，随着围压的增高，岩体的延性特征得到反映，当围压水平进一步增高时，甚至表现为理想弹塑性，把握岩体基本力学特征随围压的转换对工程设计具有极其重要的意义。

技术关键：传统的本构方程仅能描述岩体的某一种特定力学行为，如脆性特征或理想弹塑性特征。不过，不论是哪种本构关系，都是岩体非线性的不同表现方式。从这个角度上讲，只要建立岩体非线性与围压之间的关系，即可以用一个本构描述不同的传统非线性行为。

成果描述：图 10 右下是某工程中等坚硬岩石室内三轴试验获得的脆—延转化特性，满足工程需要的研究工作的第一步是论证程序具备描述脆—延转化特性的能力和获得相应的力学参数，采用 FLAC3D 和 3DEC 完成的对应于实验室条件下的数值试验成果分别列于图 10 左下、右上、和右下，数值试验成果与物理试验成果可以高度吻合，证明 3DEC 在描述岩体复杂非线性行为能力上可以与 FLAC3D 一样出色，实际上，二者在这方面不存在差别。

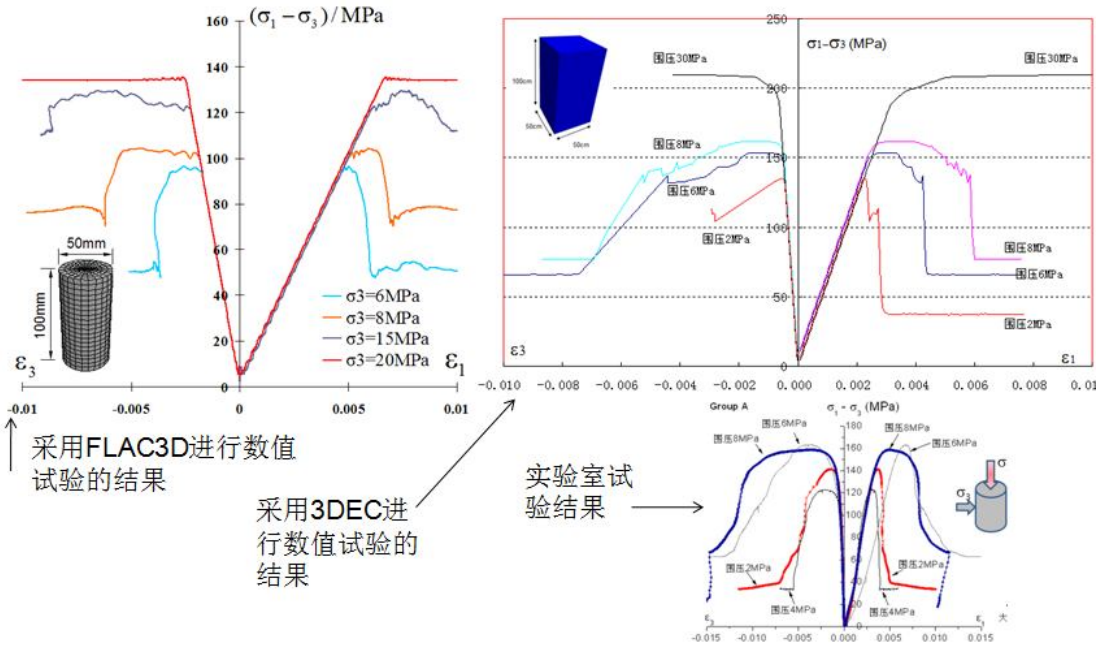


图 10：岩石复杂非线性特征的物理和数值试验成果

分析篇之案例二：非连续非线性分析

问题的提出：一些工程问题如大型高边坡、中等埋深以下的地下工程围岩潜在破坏可能既不是绝对的非线性（岩体剪断破坏）问题、也不是绝对的结构面控制块体破坏，而是二者的结合，即某种程度上受到结构面影响（非连续），同时也可以剪断岩体（非线性），在力学性质上成为非连续非线性问题。

解决途径：UDEC 和 3DEC 除具备非线性求解能力以外，还具备强大的非连续功能，这两者可以视问题的需要单独使用，也可以联合在一起体现在一个模型中，即实现了非连续非线性问题的求解。

实例一：复杂地下洞室群围岩稳定性分析（孟国涛，2009）

工程背景：某中等埋深的巨型水电站地下厂房的围岩为层间错动带控制的单斜地层，其中还发育着的若干层内错动带、小断层和长大裂隙，这些由勘探成果揭示的确定性结构面对围岩的稳定性具有重要而直接的影响。

解决途径：采用 3DEC 可实现对地质勘探成果的最大利用，即利用 3DEC 非连续非线性分析功能能够正确反映块体的连续非线性力学特征和结构面的非连续非线性特征，从而正确计算分析由块体与结构面为组成的工程岩体的变形和破坏行为。

成果叙述：围岩非连续非线性力学分析的结果如图 11 所示，直观地，由 C_4 控制的主厂房顶拱、T_{812} 与 T_{814} 控制的高边墙块体、f_{814} 影响的母线洞上部岩体都出现了较大变形，计算收敛应变都大于 1%，成为了工程开挖与支护设计重点关注的部位。特别地，进一步针对计算速度场的分析可知，由 T_{812} 与 T_{814} 控制的块体在模型计算整体达到平衡时，仍具有较大的剩余下滑力，即其运动位移随着计算步的增加而持续增大，实际上可判别为失稳状态。

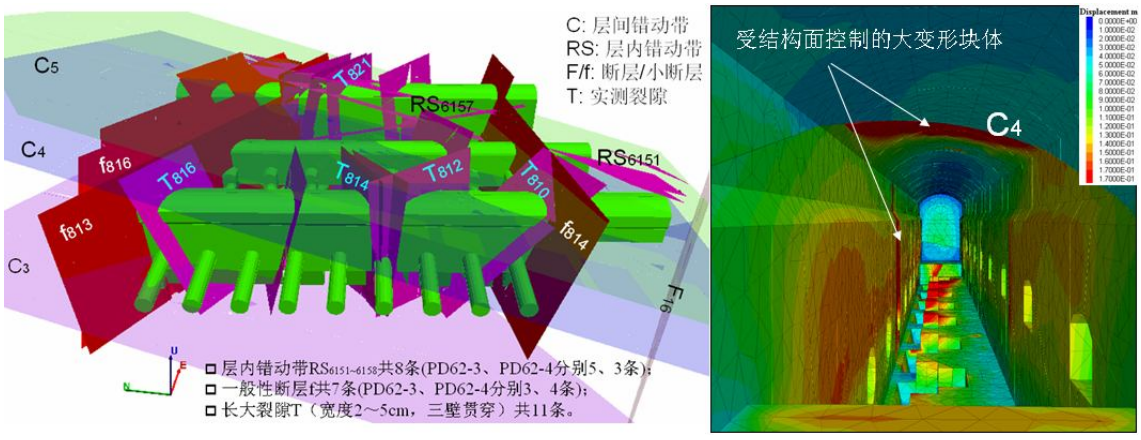


图 11：考虑确定性结构面（层面、断层、长大裂隙）的围岩变形特征

实例二：优势节理组影响下的边坡变形稳定性分析（李浩、朱焕春，2005）

工程背景：某深切河谷地区水电高边坡地质构造复杂，具有强烈空间三维特性的结构面决定了工程岩体的各向异性，对边坡稳定性具有重要、甚至是关键性的影响。

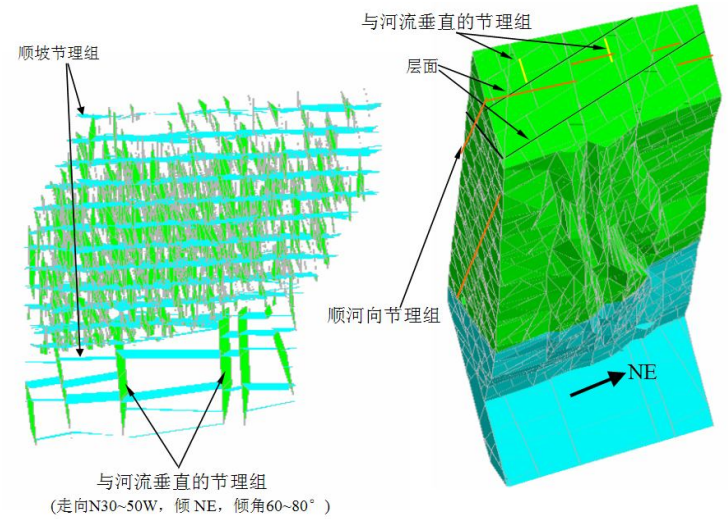


图 12：3DEC 模型中的层面和节理

技术关键：由于若干不同等级和不同规模的结构面对工程岩体安全的意义都不一样，复杂构造条件下岩体的非连续性、各向异性使得以复杂本构描述宏观岩体力学行为的传统方法不具可行性，而非连续方法成为了解决此类工程问题的有效途径。

成果叙述：采用 3DEC 进行的蜕化连续和非连续的计算位移分布如图 13 所示，显然地，非连续非线性的计算结果更能反映工程岩体的实际变形特征。

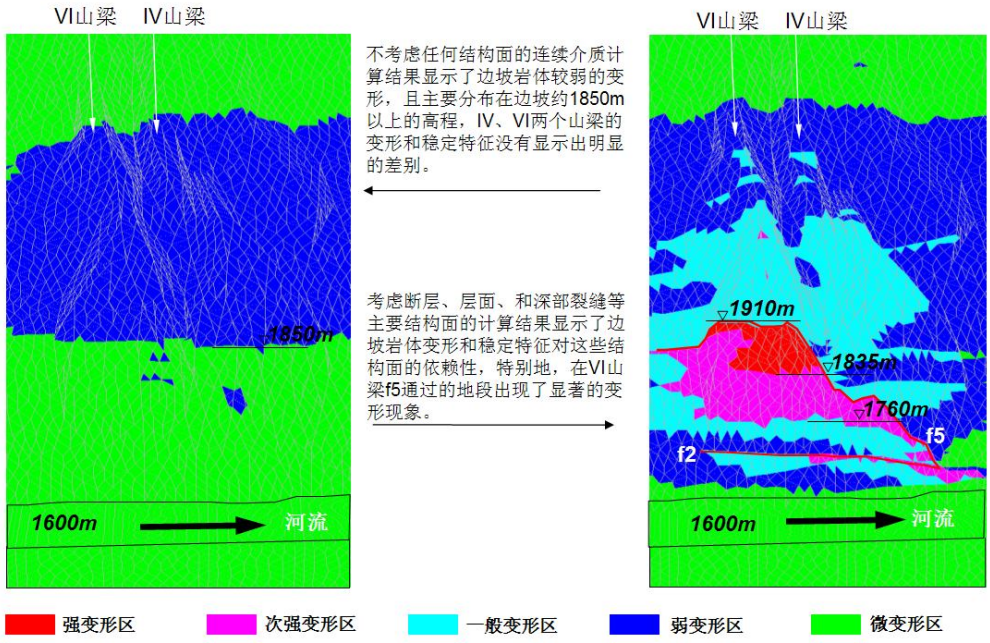


图 13：连续非线性（左）与非连续非线性（右）的计算位移比较

实例三：三峡船闸边坡特殊变形机理分析（朱焕春，2003）

工程背景：三峡永久船闸高边坡开挖过程中某闸首一带的中隔墩出现了向北侧的变形现象，即所谓的中隔墩北倾变形问题。由于中隔墩是南北两线船闸闸室之间的保留岩体，从基本力学概念上讲，两侧闸室的开挖应导致中隔墩两侧边墙分别向两个临空面、即南北两个方向的变形，南侧边墙的北倾变形不合符一般认识，其变形机理引起了广泛关注。

技术关键：分析工作的重点是对变形岩体基本地质条件及其决定的力学性质的把握，并在这一基础上选择合理的手段、对关键环节的问题进行模拟。中隔墩低地应力水平和高岩体强度的基本条件决定了结构面对变形的控制作用，即问题的非连续力学特性，因此，非连续力学分析是基础。

成果叙述：采用 3DEC 分别进行了不考虑锚固的连续和非连续计算，揭示了北倾结构面控制的主要结构面上盘岩体的北倾滑移破坏趋势（图 14 右上）、其下盘南侧岩体依然向南变形的正常状态，施加的锚索在加固北侧潜在不稳定块体的同时，也将其剩余下滑力转嫁给了南侧岩体，导致南侧出现北倾变形。

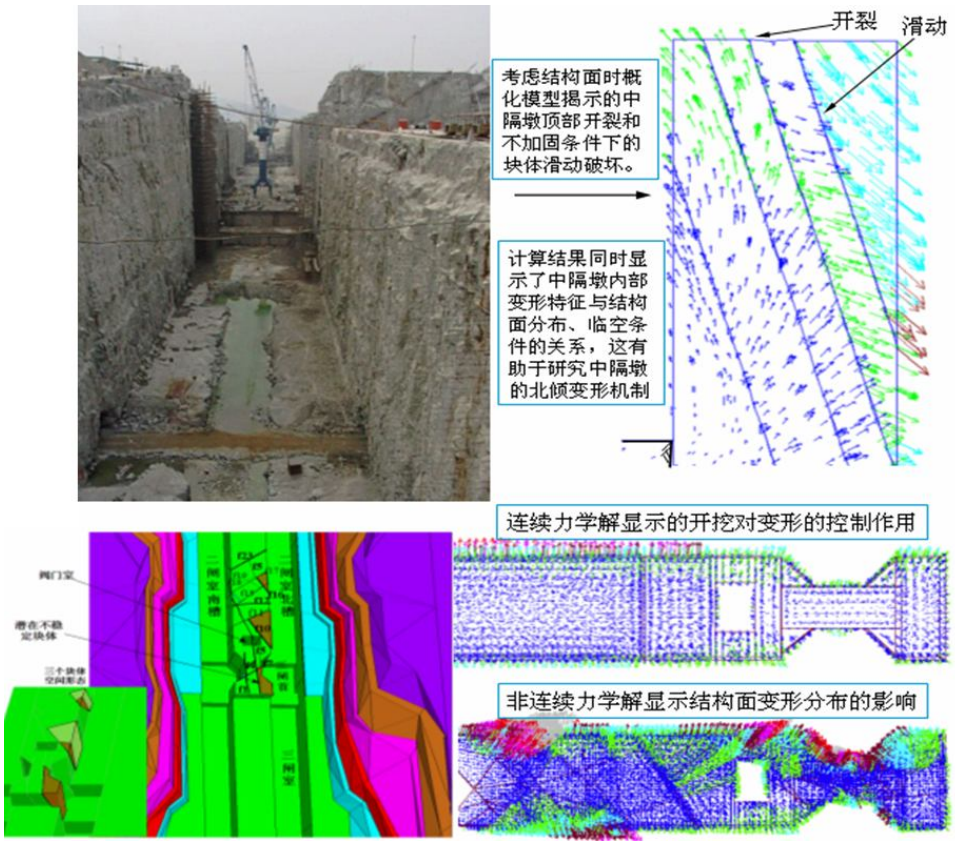


图 14：三峡船闸中隔墩北倾变形机理的 3DEC 分析

分析篇之案例三：非连续刚性块体稳定分析

问题的提出：一些工程问题如节理岩体边坡、浅埋大跨度洞室围岩潜在破坏形式都主要体现为结构面控制型块体破坏，岩块的变形可以忽略。从大量结构面切割形成的数以万计的块体中自动搜索出稳定性最差的块体，是工程设计中希望获得的信息，也是对现代数值分析的要求。

解决途径：UDEC 和 3DEC 除具备非线性求解能力以外，其非连续功能尤为强大，这两者除了联合在一起实现非连续非线性问题的求解外，更能够视问题的需要单独使用，而单纯针对岩体非连续性的模拟能够模拟海量的结构面单元（数百万计），为解决这类工程问题提供了强大的工具。

实例一：复杂地表与地下工程岩体稳定性分析（朱焕春，2006）

工程背景：某水电站进水口边坡已查明若干由断层和节理组合而成的块体，需要考虑断层、层面、和节理等结构面之间的各种随机组合方式和形成的块体形态，研究这些块体在边坡开挖过程中的稳定特征，并且结合现场特征分析可能存在的最不稳定块体的位置、边界条件和潜在破坏机制，从而复核各关键块体的稳定特征。

关键技术：众多结构面组合形成的半定位和完全随机块体的生产、稳定性计算显然是一项挑战性但具有工程实际价值的工作。而 UDEC/3DEC 能够模拟成百上千的结构面切割块体，描述块体的滚动、张开、滑动等多种破坏趋势，并且反映块体之间的相互作用，显然更符合现实潜在失稳方式。

成果叙述：研究工作采用 3DEC 程序，图 15 左是开挖区域内断层和节理组合形成的半定位和随机块体的分布，右图则显示了不同稳定程度块体的分布，实现了对不同稳定块体的自动搜索。

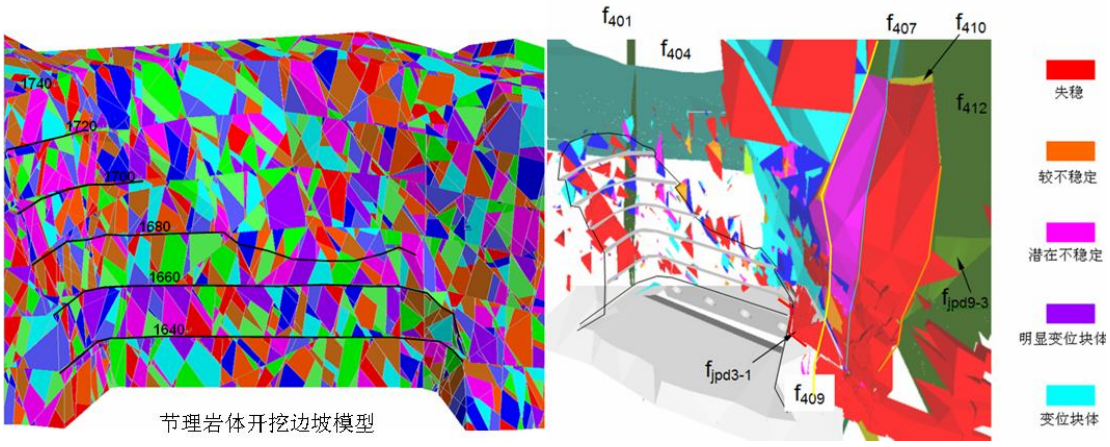


图 15：考虑层面和节理以后开挖边坡及其周边区域内的块体分布特征

实例二：浅埋大跨度地下厂房围岩破坏模式及稳定性分析（朱焕春，2004）

工程背景：某水电站浅埋大跨度地下厂房围岩以性质相对坚硬的石灰岩为主，围岩RMR 值多在 50 至 75 之间，最大主应力与（硬岩）岩石的单轴抗压强度之比为 0.25。围岩二次应力场主要通过引起结构面的变形和破坏体现出来，地下厂房围岩也因此以块体破坏为主导性的潜在破坏方式。

关键技术：现场基本条件决定了潜在问题的类型和性质，即结构面切隔块体沿结构面的变形和滑移破坏，在模拟定位结构面如夹层的基础上，准确反映隧洞围岩中随机结构面的统计分布特征是解决问题的重要基础，然后计算开挖过程中这些块体临空条件和受力条件发生变化以后块体的稳定性。

成果叙述：采用 3DEC 以研究岩性层界面、夹层、和最具优势产状的节理的模型如图 16（左）所示，在地下厂房周边一定范围内共生成了 65,000 余个半定位和随机块体，这些块体所具有的不同稳定性（变形大小）如右图所示，它揭示了下游边墙拱肩以下部位潜在的滑移型不稳定块体对边墙变形和稳定的影响，在拱肩一带的影响深度达到 6m 左右。

成果验证：这或许是中国第一个被工程所验证的复杂 3DEC 模型，地下厂房开挖期间下游拱肩以下一带围岩中出现了缓倾结构面脱空现象，现场测试成果表明，其影响深度最大在 6m 左右，验证了施工前的预测成果。

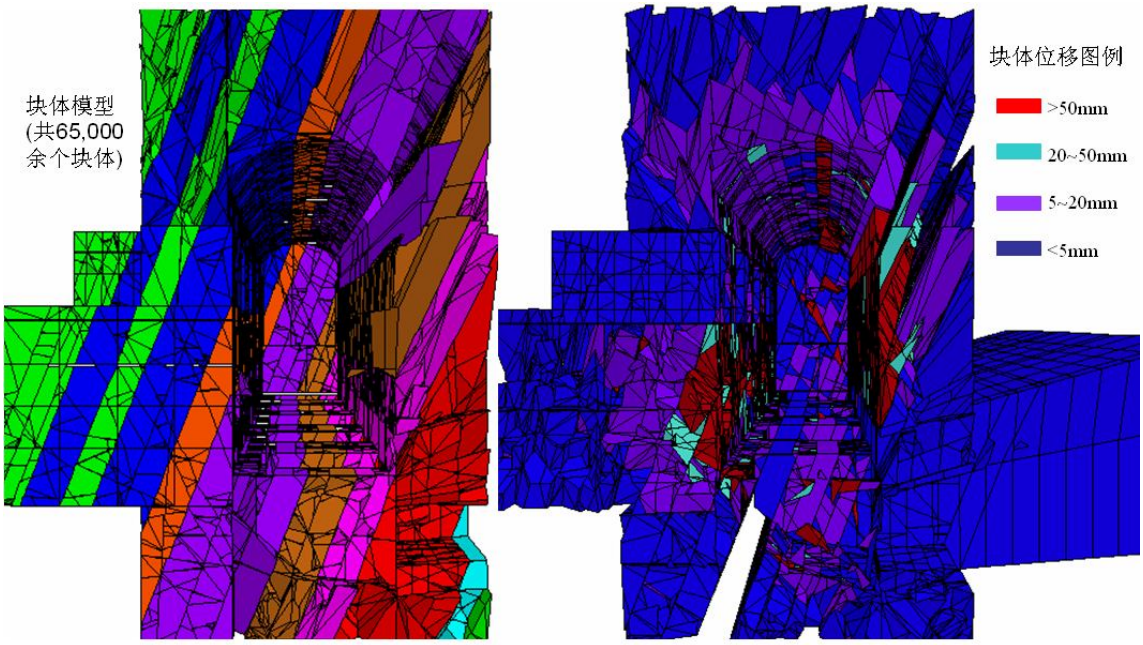


图 16：围岩非连续块体模型计算得出不同稳定特征的围岩块体分布

实例三：复杂洞室群围岩潜在不稳定块体分布特征（孟国涛，2009）

工程背景：某水电站地下厂房围岩以性质坚硬的玄武岩为主，主要发育的结构面包括层间（内）错动带（如 C_4、C_5），小断层（如 f_{814}）、长大裂隙和随机节理组，优势节理组与定位结构面组合条件下的块体稳定问题成为了围岩稳定性分析工作的重点之一。

关键技术：与实例二类似，现场基本条件决定了潜在问题的类型和性质，而准确反映洞室群围岩中各级结构面的分布特征是解决问题的重要基础，采用 3DEC 以研究层间（内）错动带、断层、长大裂隙、和最具优势产状的节理的模型如图 17 所示。在这一块体模型基础上计算开挖过程中块体临空条件和受力条件发生变化以后块体的稳定性。

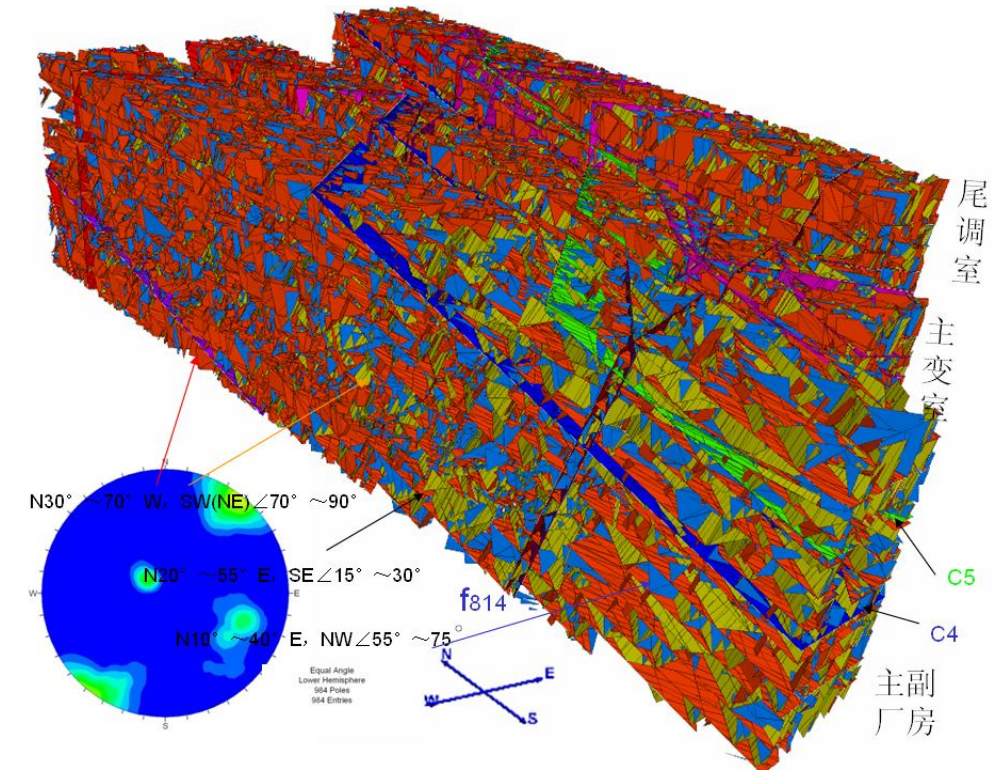


图 17：地下厂房围岩中各级结构面的分布特征

成果叙述：以尾调室为例，计算得出块体所具有的不同稳定性（变形大小）如图 18 所示，可见受 C_4、T_{817}、T_{820}、T_{821}、f_{813} 和节理切割的下游边墙形成大位移块体，同时受 C_4、T_{822} 和节理切割的南侧隔墙也可能形成大位移块体。研究工作直观揭示了潜在不稳定块体的失稳模式及分布范围，对实际工程中判断围岩松弛范围、深度和制定相应的加固措施具有积极的意义。

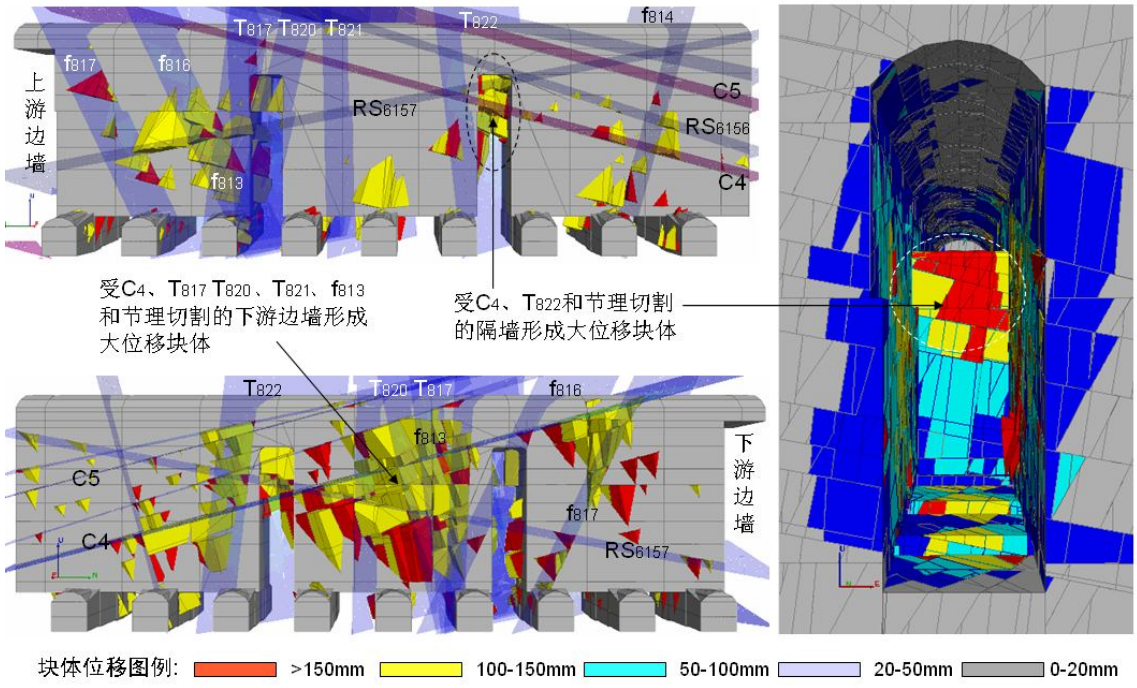


图 18：不同稳定特征的尾调室围岩块体分布

实例四：特殊柱状节理岩体的变形破坏分析（孟国涛、郑文棠，2009）

工程背景：某巨型水电站地下厂房为峨眉山玄武岩组，尾调室高边墙广泛发育柱状节理玄武岩，密集型的柱状节理（柱体长 0.5～2.0m，直径 0.25～0.5m）决定了岩体的强烈非连续性、各向异性特征，成为了是工程设计关注的重点因素之一。

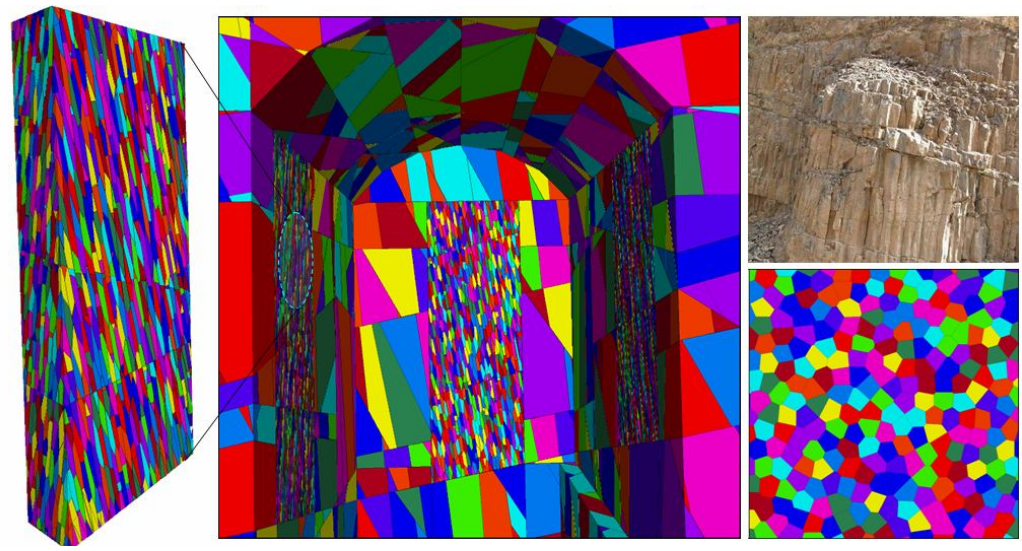


图 19：在Ⅳ级结构面基础上增加了柱状节理的洞室模型

技术关键：针对柱状节理的非连续性、各向异性的分析是对特殊岩体结构力学的补充，而正确反映柱状节理岩体解体破坏力学行为必须借助非连续的思想和方法。

成果叙述：采用 3DEC 直接按照实际尺寸进行的模拟如图 9 所示，显然地，在强度折减条件下，块体模型能直观反映岩体的不同破坏方式及过程。

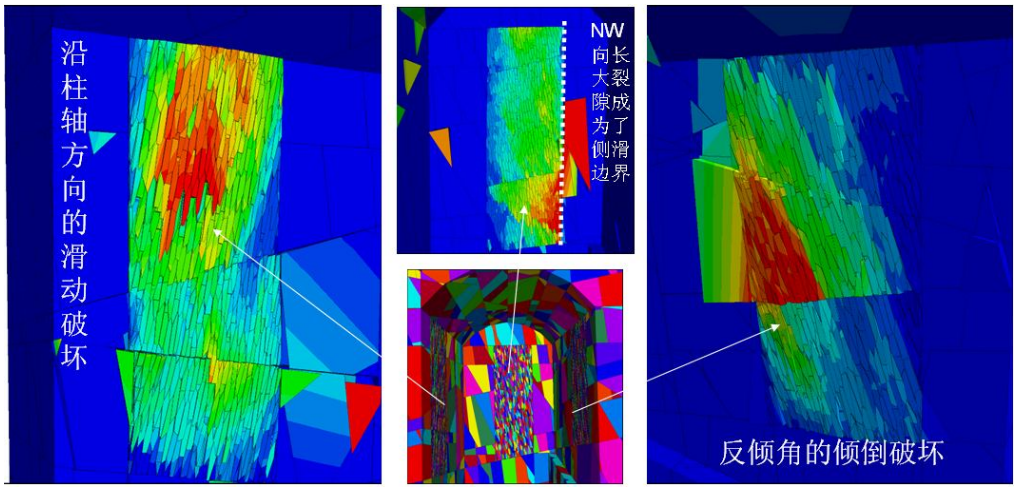


图 20：高边墙柱状节理岩体在强度折减条件下的潜在解体破坏形式

专题篇：专题研究

问题的提出：岩体工程还面临着许许多多的复杂问题，如针对节理岩体的支护设计、岩体裂隙水渗流、结构体动力破坏、岩体破坏时间效应、温度应力耦合，等等。

解决途径：与众多基于连续介质力学方法不一致地，UDEC/3DEC 能够基于非连续非线性的基本模型，实现对结构单元、裂隙渗流、热力学、动力问题等的求解。

实例一：复杂地下洞室群围岩支护分析（ICG，2006）

工程背景：某浅埋节理岩体地铁站设计要求对动态开挖支护条件下重力驱动型块体稳定性进行分析，并且对由全长粘结锚杆与钢纤维喷射混凝土的联合支护系统的合理性进行评价。显然地，低应力条件下复杂洞室群开挖的群洞效应及动态支护模拟成为了该工程数值分析的重点。

关键技术：基于等效连续介质的模型往往难以充分反映支护效果，相应地由提高岩体力学参数间接反映群锚等支护效应的方法也缺乏严格依据，而现代数值分析的支护设计模拟更强调针对地质缺陷的加固，需要直接模拟岩体与结构单元的相互作用（其中还包括一些接触非线性的规律等），最终揭示支护效果及薄弱环节。

成果叙述：采用 3DEC 进行的岩体支护设计模型如图 21 所示，其中右上图说明了锚杆应力的差异，而右下图说明了衬砌的受力情况。可见，采用直接模拟方法能够更准确而直观地反映锚杆受力和衬砌的支护效果，揭示由地质条件及结构体型决定的重点加固区域，从而起到有效的评价与优化设计的作用。

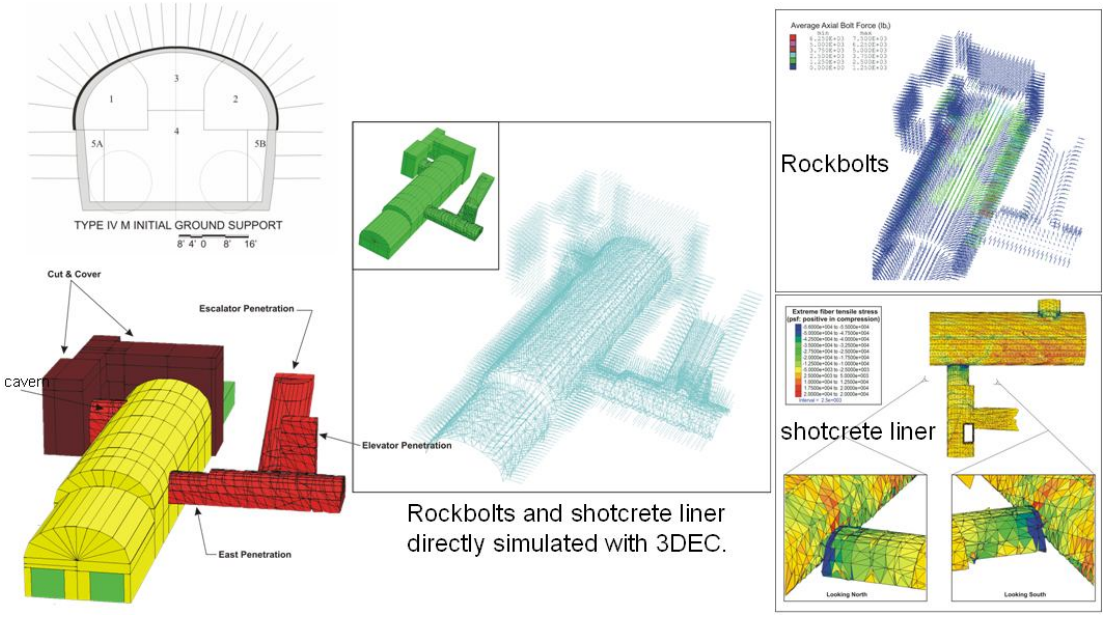


图 21：直接模拟锚杆和衬砌支护效应的 3DEC 模型

实例二：裂隙水渗流应力耦合分析（孟国涛，2008）

工程背景：某抽水蓄能水电站设计静水头 630m、动水头 770m，下平洞高压水道段出现的渗漏及衬砌裂缝现象成为了工程关注的特殊问题。由于该隧洞围岩为坚硬的花岗岩，地质构造也相对简单，使得厚度较大的主要构造成为了主要的导水通道，而裂隙水压力相应地成为了衬砌裂缝形成的主要动力来源。

技术关键：岩体渗流力学是岩石力学与工程研究和应用领域的重要分支之一，实际工程中，具有方向性的裂隙渗流普遍存在明显的非线性和各向异性特征，因此不能简单地套用基于均质砂土恒定流试验总结得出的线性渗流定律，即裂隙岩体渗流一般不符合各向同性的达西定律。基于离散网络模型和立方定律的裂隙渗流理论的 3DEC 计算，能够实现对岩体渗流场与应力场的三维耦合分析，更具合理性。

成果叙述：采用 3DEC 计算得出高压隧洞围岩裂隙渗流规律及其作用于结构面上的法向荷载如图 22 所示，可见高压水通过结构缝向外渗流并且沿断层逐步扩散形成稳定流时，由于厂房侧岩体进行了帷幕灌浆而缺少直接的渗漏边界，因此即使没有对断层进行处理，裂隙水也只是能进入这些断层，维持较高的水压力。相反地，由于 F304 为主要的控制型导水断层，而水道中的水主要通过与水道及 F304 直接、间接连通的导水断层可形成渗漏，所以，靠 F304 侧由于具有断层的排水减压作用，随着裂隙水的逸出，形成了较大的水力梯度，为内水外渗提供的通道。

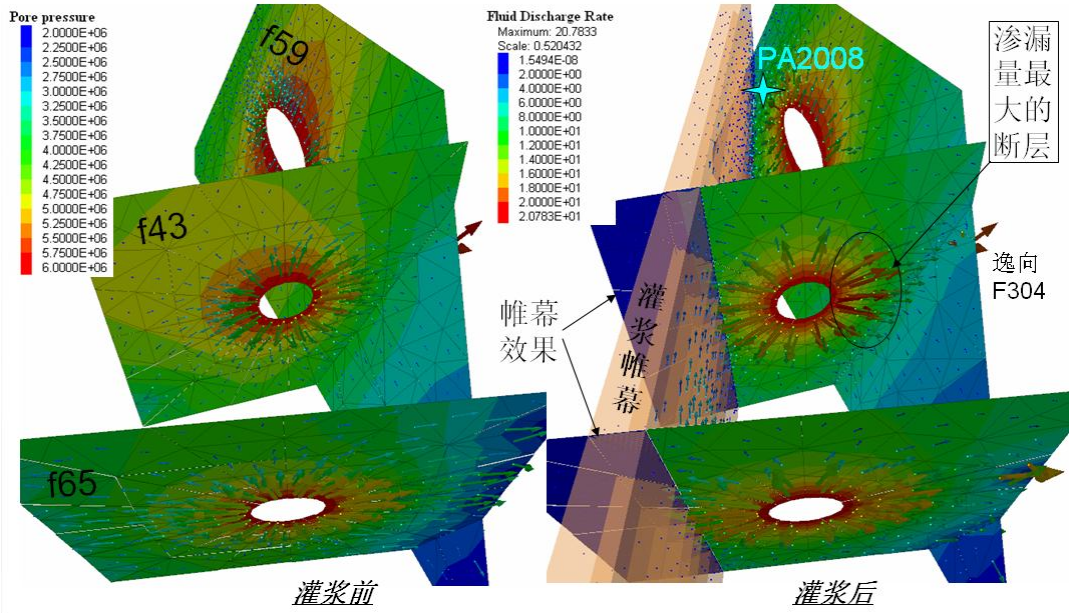


图 22：高压隧洞围岩裂隙渗流规律及其作用于结构面上的法向荷载

实例三：岩体破坏时间效应分析（ICG，2004）

工程背景：高放射性核废料处理中经常需要评价数万年以后岩体特性的变化及其涉及到的地下设施稳定安全问题，脆性岩体强度随时间衰减以后对围岩稳定性的影响成为核废料处置设计和评价的环节之一，设计工作需要评价和设计保证核设施安全的围岩支护方式和具体要求。

技术关键：岩体强度特征的时间效应是岩石力学研究的前沿课题之一，在数值模型中描述岩体强度特征随时间变化及其导致的岩体稳定性变化显然是更有挑战性的关键技术环节。从核设施安全的角度，设计工作需要评价围岩破坏对衬砌施加的动载和静载，保证衬砌的安全。应该说，这一问题在岩体强度时间效应、围岩破坏模拟、破坏后的荷载转换等多个环节上都存在着基本理论和技术手段上的挑战，反映了这一研究方向的国际发展前沿动态。

成果叙述：图 23 给出了采用 UDEC 获得的计算成果，采用非连续方法计算获得的围岩破坏形态一目了然，数值计算中岩体的模拟方式、破坏的表达等都显示了独到之处。左图清晰地显示了围岩破坏和衬砌仍然保持安全状态，而右图则显示围岩不同破坏方式下衬砌出现的破坏现象。

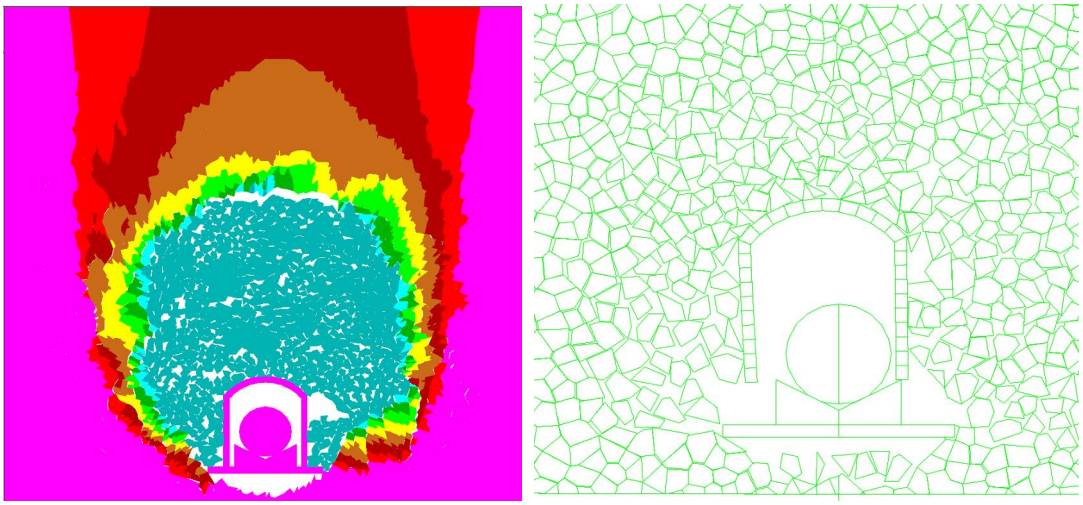


图 23：核废料存储场围岩强度弱化及其导致的围岩和衬砌破坏

解译篇：成果解译与展示

问题的提出：数值计算成果如何通过工程语言表达、即计算获得的变形、应力、屈服区所代表的实际工程意义如何，是数值计算工程应用不可或缺的一个环节。

解决途径：扎实的理论基础、对计算程度的高度了解、丰富的工程实践经验是正确运用数值计算和进行成果解译的基础，只有实现理论、手段、实践的三者合一，才能实现数值计算成果的正确合理解译。工程问题数值成果解译具有浓厚的个性化特征，即需要根据具体问题特点而定，但也具备一些共性的特征，比如结构面控制型问题和应力型问题的成果解译一般遵循不同的思路。

实例一：边坡变形破坏机理的成果解译（朱焕春，2008）

工程背景：某地表自然边坡由坚硬的火成岩组成，岩体内结构面发育，属于典型的结构面控制型问题，研究任务之一是分析边坡潜在变形发展趋势和重点变形区域。

关键技术：UDEC 和 3DEC 中计算获得的位移包括两部分，即破坏前的连续变形和破坏后的运动位移，后者确切地表征了力的不平衡关系，即失稳，因此，只要通过某种方式确定运动位移是否产生，即可以确定破坏的发生和发展过程，实现边坡宏观上变形和破坏机理的解译。

成果叙述：图 25 所示的计算成果的红色表示了不稳定，它并没有揭示预期的大型结构面控制的整体滑移变形和破坏趋势，而是在图中从右到左的解体过程，这种潜在破坏机理与现场地形条件具有很好的一致性，说明边坡未来的发展趋势将延续过去的破坏方式，即从右向左的条带状解体破坏。

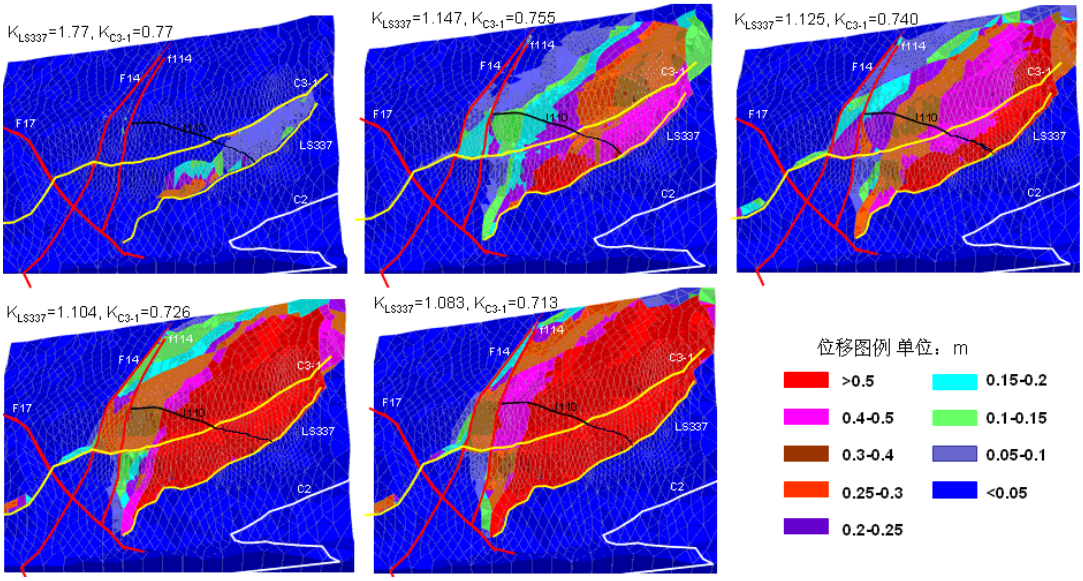


图 24：边坡变形和破坏发展过程的计算成果展示（红色为潜在不稳定区）

实例二：微震解译与微震风险评价（朱焕春，2005）

工程背景：某深埋矿山在 2005 年已经开采到 2300m 的深度并进行 2300—3000m 深度开采的初步设计，该矿山是目前世界上微震和岩爆最活跃的工程之一，设计中需要评价不同开采方式对矿山微震（冲击地压）的影响，实现开采方法和顺序的优化。

工作思路：这是一个典型的应力型破坏问题，定量评价矿山未来开采过程中微震风险需要建立微震判据。从理论上讲，微震是围岩在较高围压条件下的一种破坏方式，较高的围压水平保证了围岩破坏时所具备的能量释放水平。在评价未来开采微震风险评价时，先研究该矿山已经出现的微震所需要具备的应力条件，即为该具体工程定身打造“微震应力准则”，然后利用该准则和同样初始条件下的计算成果评价未来开采活动的微震风险，具有高度可靠性。

关键技术：建立高度适合于该具体工程的“微震应力准则”需要全面的分析能力和工作经验，必须对微震机理和发生条件、岩体力学特性、岩体初始地应力场特征等具有深刻了解和可靠把握，成果不仅适用于从应力角度评价微震风险，同时体现了利用数值计算成果解译微震发生条件和机理。

成果叙述：采用 3DEC 进行了开采过程数值模拟如图 25 所示，计算所得的高应力集中区与微震监测结果有良好的一致性，证明了数值计算对现场测试结果高度可靠的解译能力。

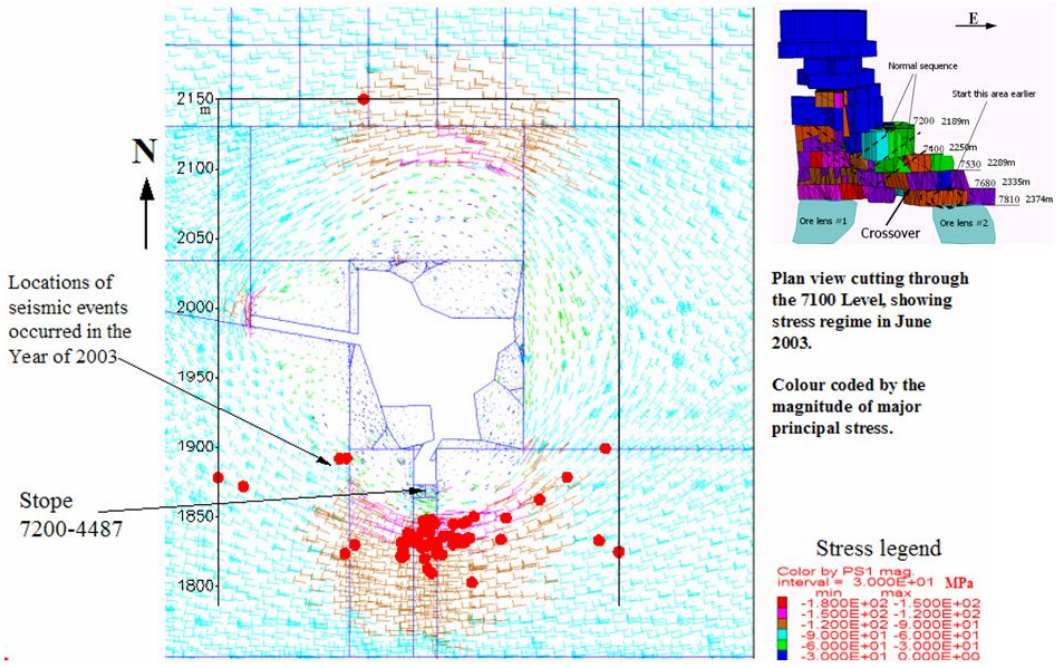


图 25：计算高应力集中区域与微震监测结果的对照

实例三：深切河谷地质现象的数值解译（朱焕春、李浩，2005）

工程背景：深切河谷地区的水电站开发中越来越多地揭示了这种特殊地形条件下存在的特殊地质现象，表现河床底部钻孔岩芯饼化、低高程岸坡勘探平洞的片帮破坏、以及岸坡一定深度处的特殊破裂现象。

技术思路：大量地质调查和测试（如测年）结果显示，这些特殊地质现象与深切河谷发育历史过程和现今状态密切相关，了解河谷演化过程中地应力场的变化特征、以及各部位历史上应力变化路径和目前状态可能导致的岩体破坏性质与表现方式是解决问题的基本思路。

成果叙述：采用 UDEC 完成的近代河谷下切过程模拟得出的岩体地应力分布规律如图 26 所示，模拟所得的应力分布反映了深切河谷地区的地应力分布特征，并且与地质勘探成果有良好的对照关系，并以这种方式解译了不同部位可以具备的地质现象。特别低，对深部裂缝发育部位的应力路径分析（左下图）显示了该部位历史上具备的岩体高围压破坏条件，导致岩体的破裂。特别低，当这种应力条件与特定结构面满足一定关系时，即具备断裂型微震的条件，使得河谷演变过程中的静力变化演化成特定部位岩体的动力破坏，而这种破坏机制可以解释现场观察到的全部现象（沿构造结构面发育、脱空、冲击破碎、应力节理、多向擦痕等）。

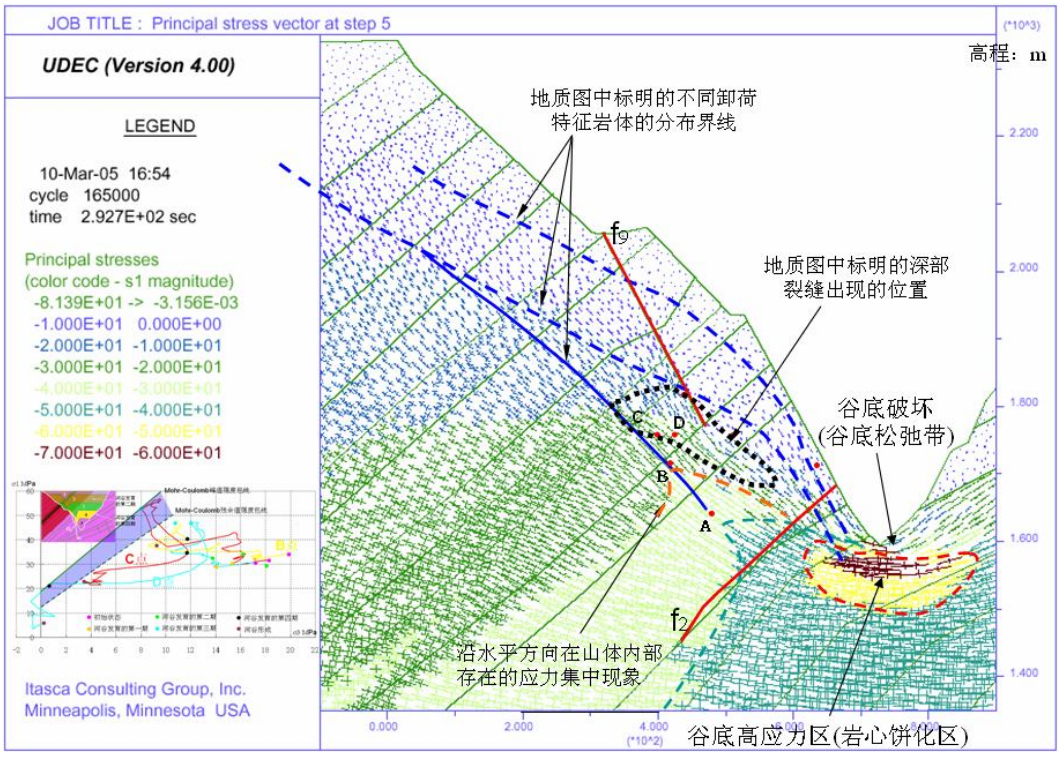


图 26：深切河谷地应力特征和深部裂缝部位的应力历史

实例四：衬砌开裂数值再现和破裂机理解译（孟国涛，2008）

工程背景：某水电站高压岔管在充水试验过程中出现了渗漏现象，放空后发现衬砌内壁出现了集中分布的羽状裂纹，明显区别于张裂破坏，具有剪切性质，分析这些羽裂的成因机制是认识问题的原因和进行工程处理方案设计的基础。

技术思路：现场查勘和采用 GoCAD 再现充水试验过程各结构面渗压特征变化的相关分析确定了问题的基本性质：围岩结构面渗流条件决定的衬砌破裂，即高压内水外渗以后改变围岩渗流压力场，反过来影响衬砌的受力条件，导致了衬砌的破裂，研究工作将通过数值再现这种特殊破裂的方式了解裂缝的产生机理和影响因素。

成果叙述：在明确了问题的基本性质以后，采用 3DEC 进行围岩结构面渗流场作用下的力学分析，重点研究隧洞两侧因为渗流边界不同对衬砌受力状态的影响。图 27 左为 3DEC 计算模型中主要水文地质边界（断层和灌浆帷幕）以及这种边界作用下衬砌顶部灌浆不密实条件下的剪应变集中，剪应变集中部位和延伸特征与右侧的素描结果（蓝色线条表示了裂纹分布）之间具有高度吻合性，计算条件即解译了裂缝成因机理和控制因素。

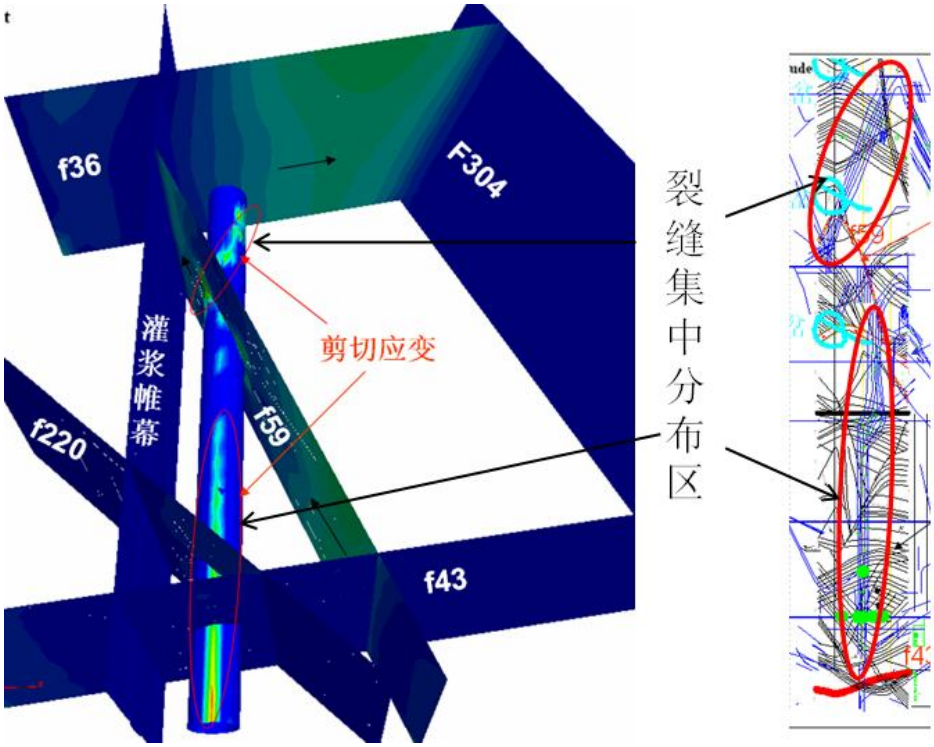


图 27：衬砌剪应变集中分布（左）和衬砌裂缝素描的对比

ITASCA开发了世界上覆盖范围最广、应用人数最多的岩土工程专业软件，包括FLAC2D/FLAC3D、UDEC/3DEC、和PFC2D/PFC3D，分布在全球12个国家的ITASCA专家日复一日地应用这些软件技术为矿山、核废料处理、石油、民用工程中的超常规岩石力学问题提供世界顶级水平的解决方案。

ITASCA集团公司是岩石力学领域世界前沿地位的高端技术机构，在岩石力学基础理论研究、数值计算软件开发、高难度超常规复杂工程问题研究和方案设计方面具有世界一流水准。公司员工70%具博士学位和10年以上的工程实践经验，在全球3个国家工程院占4席院士席位，历任国际岩石力学学会主席1期、副主席2期，1人获岩石力学界最高奖项Muller奖，多人获Rocha奖。

ITASCA（武汉）咨询有限公司继承了ITASCA理论与实践高度结合的技术特色，除一如既往地以为中国的高等学校和科研院所提供ITASCA软件产品以外，将更广泛地联合国际顶级水平的技术力量解决中国工程建设的超常规复杂岩石力学问题，服务中国的科研院所、工程设计院、和工程投资公司。

中仿科技公司是ITASCA软件在中国区的指定代理商，负责ITASCA软件中国区的销售、培训、技术支持。CnTech将始终怀着"谦虚、诚实、敬业"的态度，秉承"关注客户需求、提升客户价值"的核心理念，为国内外客户提供全球最前沿、最顶端、最专业的科技服务，力争成为仿真科学技术领域的行业典范！

GEO岩土科技（武汉）有限公司是融合岩土工程领域世界一流技术机构的技术特色而成立的外商独资高科技企业，是这些技术机构在中国区负责推广其杰出技术产品和技术服务的紧密合作伙伴，根据您的需要提供技术产品满足自身发展的需要、或者提供技术服务帮助解决特定的工程问题。

技术中心

Itasca公司
ITASCA Consulting China LTD
E-mail: software@itasca.cn
网　址: www.itasca.cn
联系电话：+86-27-87862349

营销中心

中仿科技公司
CnTech Co.,LTD
E-mail: info@cntech.com.cn
网　址: www.CnTech.com.cn
全国统一客户服务热线：400 888 5100

服务中心

GEO岩土科技有限公司
GeoEngin Co.,LTD
E-mail: info@geoengin.com
网　址: www.GeoEngin.com
联系电话：+86-27-59838973