

引用格式: 李涛, 张丽, 蒋庆, 等. 基于 GDEM 的隐伏岩溶隧道隔水岩体水压致裂安全厚度及破裂演化规律分析[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(1): 67.

LI Tao, ZHANG Li, JIANG Qing, et al. Safe thickness and fracture evolution law determined for hydraulic fracturing of water-resistant rock mass with hidden karst based on GDEM[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(1): 67.

## 基于 GDEM 的隐伏岩溶隧道隔水岩体水压致裂安全厚度及破裂演化规律分析

李涛<sup>1</sup>, 张丽<sup>2,\*</sup>, 蒋庆<sup>1</sup>, 冯春<sup>2</sup>, 赵然<sup>1</sup>

(1. 山东高速济莱城际公路有限公司, 山东 济南 250014; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

**摘要:** 为分析隐伏岩溶水压致裂对隔水岩体安全厚度和破裂演化规律的影响, 采用基于连续-非连续数值计算方法的高性能软件 GDEM-DAS 开展三维数值模拟研究, 通过分析掌子面的位移演化规律获得不同水压下隔水岩体的安全厚度, 同时引入无量纲指标破裂度来定量描述隔水岩体随开挖进程的破裂演化规律。通过计算, 获得水压分别为 1、2、3 MPa 时掌子面监测点的位移和研究区域破裂度的变化曲线。计算结果表明: 1) 不同水压下隔水岩体的安全厚度均为 7 m; 2) 掌子面位移和破裂度均存在突变点, 且破裂度突变点早于 6 m, 说明岩体内部损伤到灾变状态时才会引起位移突变; 3) 在同一计算工况下, 不同溶洞水压下的位移和破裂度突变点具有一致性, 说明水压非影响隔水岩体稳定性的首要因素。

**关键词:** 岩溶隧道; 隔水岩体; 破裂度; 安全厚度; GDEM; 数值分析

DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2021.01.008

文章编号: 2096-4498(2021)01-67-10

中图分类号: U 45

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



扫二维码听语音  
与作者在线交流

## Safe Thickness and Fracture Evolution Law Determined for Hydraulic Fracturing of Water-Resistant Rock Mass with Hidden Karst Based on GDEM

LI Tao<sup>1</sup>, ZHANG Li<sup>2,\*</sup>, JIANG Qing<sup>1</sup>, FENG Chun<sup>2</sup>, ZHAO Ran<sup>1</sup>

(1. Shandong Hi-speed Ji-Lai Intercity Highway Co., Ltd., Jinan 250014, Shandong, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** To analyze the influence of hydraulic fracturing in hidden karst structures on the safe thickness and fracture evolution of a water-resistant rock mass, a high-performance GDEM-DAS based on the continuum-discontinuum element method is used to conduct three-dimensional numerical simulation. The critical thickness of the rock mass is determined on the basis of the displacement evolution law of the tunnel face, and the fracture degree, a dimensionless index, is introduced to quantitatively describe the fracture evolution law of the rock mass during the excavation process. The results show that the changing curves of displacement and fracture degree are obtained at water pressures of 1, 2, and 3 MPa. The safe thicknesses of the rock mass under different water pressures are almost the same, at 7 m. In addition, the curves of displacement and fracture degree show inflection points of fracture degree 6 m in front of the inflection point of displacement, showing that displacement mutation will occur when the internal damage of the rock mass reaches a catastrophic level. Moreover, under the same simulation conditions, the inflection points of displacement and fracture degree under different water pressures in the karst cave are consistent, indicating that the water pressure is not the primary factor affecting the stability of the water-resistant rock mass.

**Keywords:** karst tunnel; water-resistant rock mass; fracture degree; safe thickness; GDEM; numerical simulation

收稿日期: 2020-03-10; 修回日期: 2020-09-07

第一作者简介: 李涛(1988—), 男, 山东诸城人, 2011年毕业于中国石油大学(华东), 船舶与海洋工程专业, 本科, 工程师, 现从事高速公路建设管理工作。E-mail: 552126247@qq.com。\*通信作者: 张丽, E-mail: lizhang@imech.ac.cn。

## 0 引言

在富水岩溶地区,隧道与溶洞间的岩层由于开挖引起的扰动而极易失稳,引发突水、涌泥灾害,是隧道安全施工的重大问题,也是目前工程建设研究的重点之一。目前研究岩溶隧道隔水岩层稳定性的方法主要有模型试验、理论研究和数值模拟等。

模型试验需根据原型确定试验模型的几何相似比,然后根据力学方程和边界条件确定应力相似比,并采用相似材料模拟一定工况下的突水现象。魏星等<sup>[1]</sup>以北岗隧道 DK462+527~+537 段为原型,采用 1:100 几何相似比模型,模拟了围岩出现位移剧增、突泥涌水和破坏的现象,但材料的力学指标未能达到相似性要求。赵瑜等<sup>[2]</sup>建立了应力相似比为 40、几何相似比为 55 的某在建隧道模型,并与 FLAC3D 数值模拟结果进行对比,发现在各种趋势上有较好的一致性,且物理模型的最终破坏及影响范围与数值模拟有较好的一致性,但局限于材料特性和测量上的误差,未能体现数值模拟的全部现象。李浪等<sup>[3]</sup>研制出一套深长隧道突水地质灾害三维模型试验系统,该系统不仅能够模拟地应力场、水压等初始环境,还可精确模拟隧道开挖,但该模型试验是在隧道模型简化条件下进行的。Yang 等<sup>[4]</sup>研发了高地应力高渗隧道突水模型试验系统,并以重庆西马隧道为研究对象,建立了三维流固耦合模型,通过监测应力、位移、渗流压力等的变化趋势,较为真实地模拟了突水发生的过程,但采用的是相似比材料和简化模型。鉴于地层结构的复杂性和研究条件限制,模型试验只能一定程度地模拟突水现象,对工程的指导性有限。大多数理论研究是通过在现场地质模型进行一系列简化而得到相应的理论模型,对于简化后的理论模型可以用结构力学、弹性力学和断裂力学中的相关公式加以计算,从而得到临界安全厚度<sup>[5]</sup>。李利平等<sup>[6]</sup>以断裂力学、弹塑性力学理论为基础,推导出隧道最小岩石保护厚度的半解析表达式,并认为岩溶隧道裂隙突水具有明显的时空效应特征。郭佳奇等<sup>[7-8]</sup>针对侧壁溶腔,以塑性区和高渗透带贯通与否作为判定中间岩柱最小安全厚度的标准,建立最小防突厚度计算公式;基于弹性厚板理论,推导了边界条件分别为固支和简支 2 种模式的岩溶隧道掌子面岩墙安全防突厚度及临界水压计算公式。Yang 等<sup>[9]</sup>基于 Hoek-Brown 非线性破坏准则,利用上界定理和变分原理推导获得了隔水岩柱的安全厚度,并研究了各参数的影响,绘制出了突水破坏区域。地质工程的复杂性使各种理论研究和模型试验缺乏有力的支持,相比之下,数值模拟方法具有较广泛的适用性,成为解决岩土工程问题的有效工具。随着计算机技术的迅猛发展,各种数值计算方法越来越普遍地被应用到围岩

稳定性分析中<sup>[10-11]</sup>。

目前,隧道围岩采用的数值计算方法主要为有限元法、有限差分法和离散元法等,ABAQUS、MIDAS/GTS 等为有限元软件;FLAC3D 为有限差分软件;UDEC、3DEC 等为块体离散元软件。余健等<sup>[12]</sup>针对笔架山隧道建立了三维有限元模型,采用弹塑性模型进行计算,通过监测地表、拱顶、拱腰等的位移变化,分析开挖的影响。谢海文等<sup>[13]</sup>利用二维离散元数值模拟软件 UDEC,分析了贵州省德江隧道围岩中裂隙的响应特征、流固耦合效应和渗流场分布特征。黄明利等<sup>[14]</sup>利用岩石破裂过程分析程序(RFPA),建立了二维平面应变模型,对隧道施工诱发隐伏溶洞破裂突水过程中的应力场、位移场和声发射等特征进行了系统研究。徐长金等<sup>[15]</sup>基于 MIDAS/GTS 有限元分析软件,分析了溶洞半径以及溶洞与隧道底板距离的变化对围岩应力分布和塑性区范围的影响。雷霆等<sup>[16]</sup>利用 FLAC3D 有限差分软件进行三维隧道开挖模拟,分析了顶部溶洞与隧道掌子面附近围岩塑性区的发展趋势,以及不同溶洞水压下隧道的安全厚度。李红卫<sup>[17]</sup>采用数值分析软件 ABAQUS 对贵阳轨道交通建设中的隧道底部溶洞围岩稳定性进行三维数值模拟,分析了距隧道断面不同间距下溶洞对隧道底部、顶部和地表位移的影响。Shan 等<sup>[18]</sup>利用 FLAC3D 建立了三维隧道模型,对 3 种不同位置的溶洞开展了数值模拟,并采用经验公式分析了各因素对安全厚度的影响程度,认为数值方法更具合理性。岩体的破裂包含小变形、损伤演化、裂纹萌生、裂纹扩展以及大位移、大转动等阶段,是一个连续到非连续的破坏过程。因此,隔水岩体的破坏是开挖扰动引起的裂隙扩展、贯通直至破裂的渐进过程<sup>[6]</sup>。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。目前大多数研究以溶洞的空间二维分布形态为主,三维模型受软件本身计算能力的影响,网格较大,精度较差,计算耗时多。因此,大多数数值模拟软件无法真实模拟三维隧道的开挖突水破坏过程。

从上述分析可见,模型试验、理论研究对于描述突水这种复杂地质体的力学行为具有一定局限性,而传统数值模拟方法在描述岩体渐进破坏过程和计算精度方面均有不足。本文选取 GDEM 系列中的 DAS 软件,建立百万单元三维溶洞隧道模型,分析在高地应力、高溶洞水压下,开挖扰动引起的岩体破坏演化规律;为了分析隔水岩体的渐进破坏过程,引入无量纲指标破裂

度来量化描述岩体的破裂状态;通过监测掌子面位移变化特征,获得隔水岩体的安全厚度,并分析在这一过程中隔水岩柱的破裂发展趋势与位移之间的对应关系。

### 1 基于 GPU 加速的 CDEM 算法

GDEM 应力分析系统(GDEM-DAS)是基于连续-非连续介质力学的离散元方法 CDEM (continuum-based discrete element method)<sup>[19-21]</sup>的高性能有限元-离散元计算软件。该软件以 CDEM 理论为基础,利用 GPU(显卡)进行加速计算。CDEM 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,目前已广泛应用于滑坡、爆破、地下工程等行业<sup>[22-24]</sup>。

#### 1.1 CDEM 算法的基本概念

CDEM 中的数值模型由块体及界面 2 部分构成,如图 1 所示。块体由 1 个或多个有限元单元组成,用于表征材料的弹性、塑性、损伤等连续特征;2 个块体间的公共边界即为界面,用于表征材料的断裂、滑移、碰撞等非连续特征。界面包含真实界面及虚拟界面 2 个概念,真实界面用于表征材料的交界面、断层、节理等真实的不连续面,其强度参数与真实界面的参数一致;虚拟界面主要有 2 个作用,一是连接 2 个块体,用于传递力学信息,二是为显式裂纹的扩展提供潜在的通道(即裂纹可沿着任意一个虚拟界面进行扩展)。

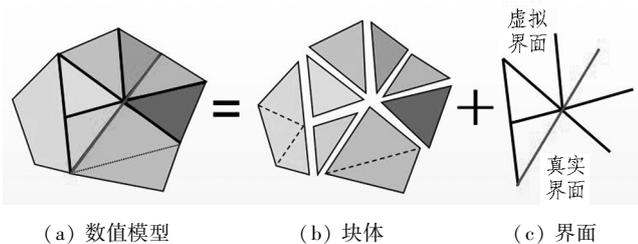


图 1 CDEM 中的数值模型构成

Fig. 1 Construction of numerical model in continuum-based discrete element method(CDEM)

#### 1.2 离散特征

采用 CDEM 方法描述连续-非连续问题时,连续部分采用有限元离散,非连续部分添加界面接触表征其力学特征,相邻接触面通过空间拓扑信息进行查找,在公共接触面两侧块体的相应节点间建立弹簧(包括法向弹簧和切向弹簧),接触面之间的相互作用力由弹簧力和弹簧的特征面积来表征。假设计算区域被结构面  $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_3$  切割后形成 3 个区域,各个区域内需要进行有限元离散,接触边界也需要进行离散化并建立界面接触来表征结构面,如图 2 所示。

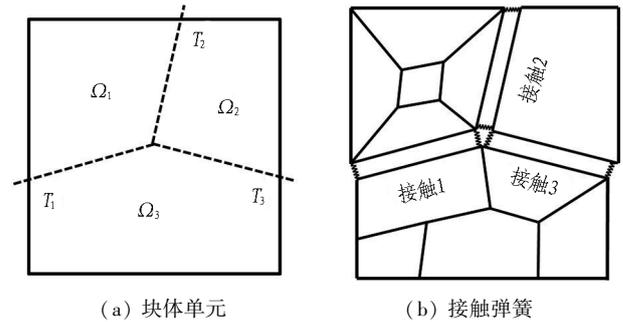


图 2 数值离散后的块体单元和接触弹簧

Fig. 2 Block elements and contact spring by numerical discrete

#### 1.3 破裂判断准则

CDEM 采用基于时程的动态松弛技术进行显式迭代计算,因此可获知每时步的单元应力和节点弹簧力,并根据破裂准则进行强度判断,将发生破裂的节点弹簧力置为 0,并记录破裂弹簧的特征面积。本文拟在块体部分采用线弹性模型,界面接触弹簧采用张拉-压剪复合准则判断其破坏状态。张拉模式的弹脆性破坏采用最大张力准则:

$$\sigma_n = \begin{cases} k_n u, & \sigma_n < \sigma_1; \\ 0, & \sigma_n > \sigma_1. \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\sigma_n$  为接触法向应力;  $k_n$  为法向弹簧刚度;  $u$  为弹簧的法向位移;  $\sigma_1$  为接触抗拉强度。

当界面发生张拉破坏时,界面上的剪切应力也相应地置为 0。剪切模式的弹脆性破裂采用摩尔-库仑准则:

$$\tau = \begin{cases} k_t \nu, & |\tau| \leq c - \sigma_n \tan \varphi; \\ \sigma_n \text{sign } \nu \tan \varphi, & |\tau| > c - \sigma_n \tan \varphi. \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\tau$  为接触切向应力;  $k_t$  为切向弹簧刚度;  $\nu$  为弹簧的切向位移;  $c$  为接触黏聚力;  $\varphi$  为内摩擦角。

当界面接触发生破裂之后,接触所连接的两侧块体发生张开和滑动。

### 2 计算模型及材料参数

#### 2.1 模型尺寸

根据赵明阶等<sup>[25]</sup>的研究成果和弹塑性理论,隧道周边影响范围为 3~5 倍的洞径,因此,建立三维隧道计算模型为 100 m×100 m×100 m,三心圆隧道位于模型中间,开挖跨度为 19 m,高度为 11 m,衬砌厚度为 55 cm,如图 3(a)所示。溶洞简化为椭球模型,长轴为 30 m,短轴为 14 m,小于隧道跨度。考虑突水最不利位置,将溶洞置于隧道掘进的正前方,溶腔垂直隧道轴线方向( $z$ 向)的尺寸约为隧道高度的 2 倍,如图 3(b)所示。采用前处理功能较强的 ANSYS 建立几何模型后,共划分 105 万个四面体单元、420 万个节点,然后通过数据转换程序将节点单元导入到 GDEM-DAS 中,再进一步进行岩层属性设定、开挖衬砌模拟和计算分析等。

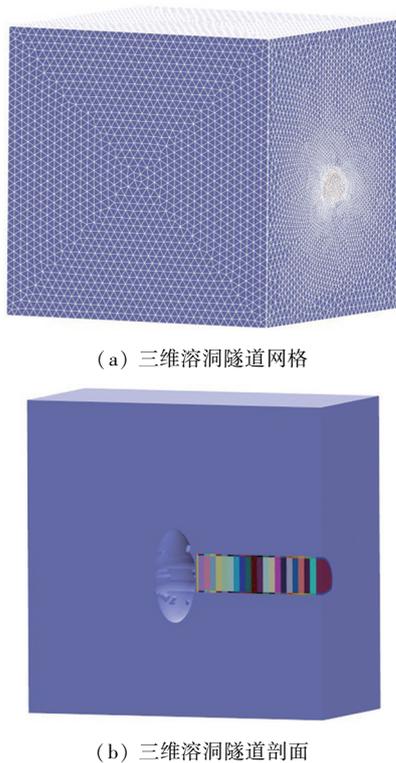


图3 三维隧道计算模型

Fig. 3 Three-dimensional tunnel calculation model

## 2.2 边界条件

计算模型设定为埋深 130 m 的深埋岩溶隧道,符合平面应变模型,因此,计算模型左右侧边界、前后边界和底部均采用法向位移约束;模型上边界( $z = 100$  m)施加上端岩体自重;根据京沪高速某公路段地应力资料,围岩侧压力系数取 1.0,转换为线性分布荷载分别施加于计算模型  $z = 0$  m、 $z = 100$  m、 $x = 0$  m 和  $x = 100$  m 4 个平面上。

鉴于溶腔轴的尺寸相对较小,可忽略溶腔内部上下水压差别,水压简化为施加于椭球内表面的均布压力。李利平等<sup>[6]</sup>研究发现瞬时突水突泥型溶洞水压一般为 1~3 MPa,本文拟分别计算水压 1、2、3 MPa 时的隔水岩层破坏状态。

## 2.3 材料参数

因地质情况复杂,各地岩石参数差异较大,本文围岩参数选自京沪高速某公路段现场测试结果。该路段采用初期支护和二次衬砌支护,初期支护包含钢筋网、钢拱架、锚杆和混凝土等材料,二次衬砌包含 C30 模筑混凝土和钢筋,各材料属性均不同,故采用等效参数进行计算。围岩和支护参数取值见表 1。

表1 围岩与支护参数

Table 1 Parameters of surrounding rock and support

类型	密度/ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	弹性模 量/ $\text{Pa}$	泊松比	黏聚力/ $\text{Pa}$	抗拉强 度/ $\text{Pa}$	内摩擦 角/ $(^\circ)$
围岩	2 300	$2.0 \times 10^{10}$	0.25	$0.5 \times 10^6$	$1 \times 10^6$	30
支护	2 500	$5.8 \times 10^{10}$	0.25	$6.0 \times 10^6$	$2 \times 10^6$	35

## 2.4 计算过程

计算过程为先采用弹性模型计算获得岩体初始应力状态,再采用强度准则模拟出围岩的初始破裂状态,然后进行开挖过程计算:采用全断面开挖模型,开挖进尺 2 m,在开挖下一进尺的同时完成上一进尺的衬砌支护,每次开挖计算均采用破坏准则迭代至 40 000 步。

选取掌子面为监测面,分别在每个监测面的拱顶、拱底、拱腰和中心位置设置监测点,如图 4 所示。通过监测开挖过程中监测点的位移变化规律,分析开挖扰动对隔水岩层的影响。

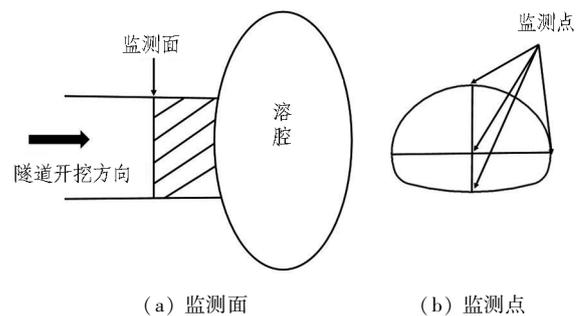


图4 监测设置示意图

Fig. 4 Monitoring settings

## 2.5 隔水岩体安全厚度

从数值模拟的角度来讲,位移能够直观地表征岩体的渐进破坏过程。在同一计算工况下,随着掌子面向溶腔方向的推进,开挖引起隔水岩体出现裂缝,随后逐渐扩展,此时掌子面的位移缓慢增加;当完全贯通时,掌子面的位移会迅速增加,存在突变现象,说明此时隔水岩体的厚度已不具备足够的安全储备。因此,可将位移值突变发生的前一开挖步视为安全厚度,在此时采取工程措施进行防治。

## 2.6 隔水岩体的破裂度

### 2.6.1 破裂度的定义

破裂是表征岩体灾变过程的重要现象,隔水岩体的破裂程度是影响突水发生的重要因素。现有的测量手段可直接测得暴露的裂缝长度,但无法由此推测出岩体内部的损伤程度以及渐进破坏过程。

为了建立隔水岩体渐进破裂程度与开挖进程之间的关系,本文借助于连续-非连续数值计算方法,模型中块体之间的界面即为潜在的破坏面,利用强度准则判断界面状态,通过弹簧断裂模拟裂缝扩展,进而通过统计弹簧力为 0 的特征面积获得当前状态下岩体的破裂面积。将当前状态下的破裂面积与界面总面积之比定义为破裂度,即破裂度

$$D = S/S_1 \times 100\% \quad (3)$$

式中: $S$  为研究区域内当前断裂弹簧特征总面积; $S_1$  为研究区域内界面总面积。

### 2.6.2 单轴压缩破裂度计算和网格依赖性验证

下面以单轴压缩为例说明破裂度的计算方法, 并进行网格依赖性验证。计算模型为直径 50 cm、长 100 cm 的圆柱, 上下端同时施加相同的加载速率  $0.5 \times 10^{-9}$  m/s, 计算模型参数见表 2, 界面弹簧参数通过材料参数计算获得。

表 2 计算模型参数

Table 2 Parameters of calculation model

密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量/ Pa	泊松比	黏聚力/ Pa	抗拉强度/ Pa	内摩擦角/ (°)
2 500	$3 \times 10^{10}$	0.25	$8 \times 10^6$	$8 \times 10^6$	30

计算模型采用张拉-压剪复合准则进行计算, 由于破裂发生在界面, 通常选用随机性较好的四面体网格进行计算。不同网格数量的计算模型如图 5 所示。为了验证计算结果的可靠性, 对四面体网格进行加密, 计算模型网格数量见表 3。

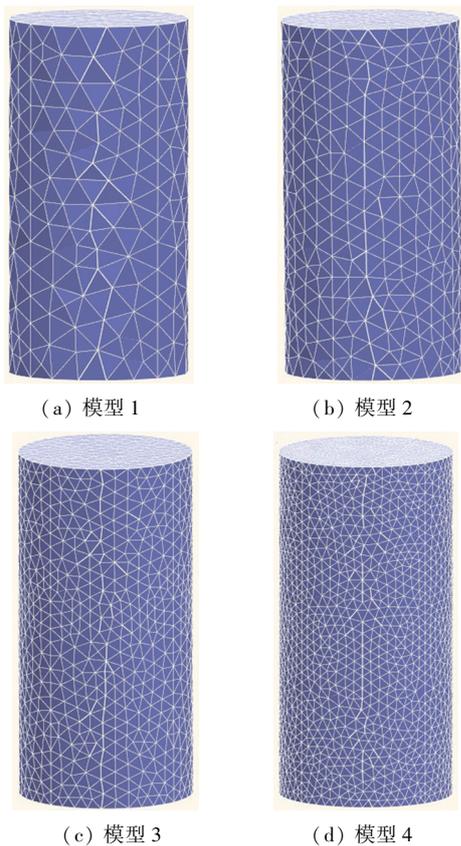


图 5 不同网格数量的计算模型

Fig. 5 Calculation model with different grid numbers

表 3 计算模型网格、接触面和弹簧组数量

Table 3 Numbers of grid, interface, and spring groups associated with calculation model

计算模型	网格数量	接触面数量	弹簧组数
1	1 899	3 394	7 596
2	4 326	7 926	17 304
3	12 246	23 022	48 984
4	31 636	60 426	126 544

研究区域为整个圆柱, 单元之间均采用界面接触模型进行计算, 通过弹簧连接, 接触面数量和弹簧组数见表 3。采用 1.3 节的破裂准则进行强度计算, 通过统计各监测时步弹簧力为 0 的特征面获得当前时步的破裂总面积, 弹簧力不为 0 的特征面积为当前时步的界面总面积, 二者之比即为当前时步的破裂度。破裂度随时步变化曲线如图 6 所示。计算结果显示, 在同一计算工况下, 不同密度网格的破裂度随加载时步的变化趋势基本一致, 都存在突变点, 在突变点后破裂度逐渐趋于稳定; 相邻网格数量的破裂度误差小于 4.3%。由此可见, 破裂度对网格的依赖性较小。

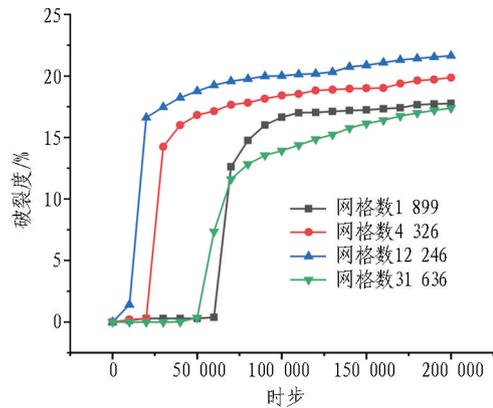


图 6 破裂度随时步变化曲线

Fig. 6 Changing curves of fracture degree with time steps

## 3 隔水岩层破坏特征分析

### 3.1 隔水岩体监测点位移变化分析

以 2 MPa 溶洞水压为例, 计算模型在重力和侧压力作用下, 弹性稳定时的  $y$  向位移云图如图 7 所示, 开挖过程中的  $z$  向位移云图如图 8—10 所示, 开挖进程中各监测点位移见表 4, 监测点处位移随开挖进程的变化曲线如图 11 所示。

计算结果说明:

1) 随着掌子面的掘进, 轴向位移扰动区呈漏斗形, 掌子面中心处位移值最大, 破坏模式比较符合弹性圆板模型, 以张拉破坏和剪切破坏为主。

2) 掌子面中心点处的位移值最大, 说明中心处最容易发生破坏, 符合隔水岩体一侧受溶洞水压、另一侧临空的受力状态。

3) 侧边位移较小且变化不大, 说明溶洞水压对拱腰影响很小。

4) 拱顶、拱底和中心处监测点位移均在距溶洞 7 m 处存在突变点。突变点左边位移值较低, 最大值在中心处(约 0.003 m), 为溶洞水压弱影响区, 隔水岩体处于稳定阶段; 突变点右边, 位移先缓慢增加后迅速增加, 为溶洞水压强影响区, 隔水岩体失稳。

5) 掌子面距溶洞 5 m 处, 掌子面中心处位移突然大幅增加至 0.01 m 左右, 且有快速增加的趋势, 说明此

时隔水岩体已开始失稳,岩体强度已不具备足够的安全储备。因此,可以认为该工况下的安全厚度为 7 m。

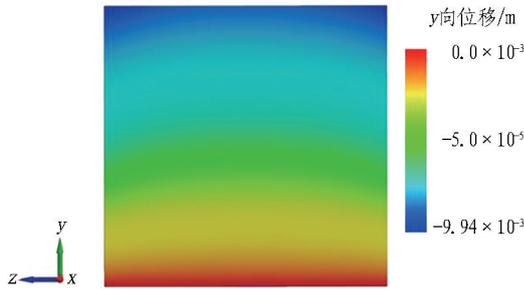


图 7 弹性稳定时 y 向位移云图

Fig. 7 y-directional displacement nephogram when considering elastic stability

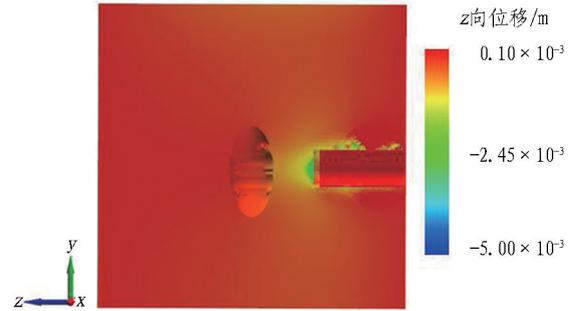


图 9 掌子面距溶洞 13 m 时 z 向位移云图

Fig. 9 z-directional displacement nephogram when tunnel face is located 13 m from karst

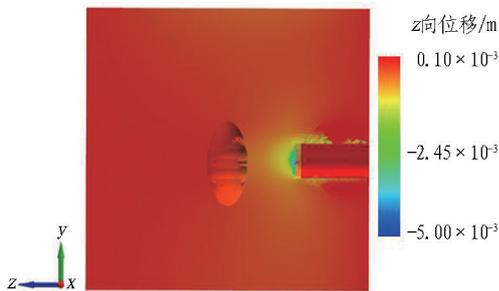


图 8 掌子面距溶洞 17 m 时 z 向位移云图

Fig. 8 z-directional displacement nephogram when tunnel face is located 17 m from karst

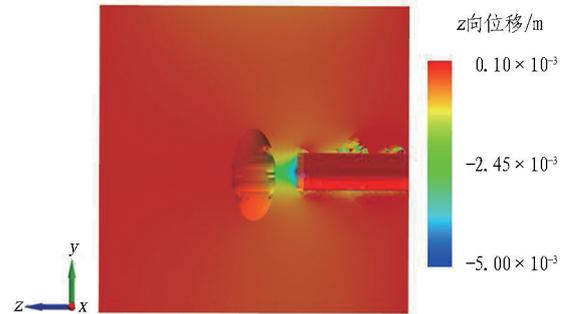


图 10 掌子面距溶洞 7 m 时 z 向位移云图

Fig. 10 z-directional displacement nephogram when tunnel face is located 7 m from karst

表 4 监测点位移

Table 4 Displacement of each monitoring point

距溶洞距离	z 向位移(拱腰)	z 向位移(拱顶)	z 向位移(拱底)	z 向位移(中心)
41	-0.000 746 208	-0.000 319 674	-0.000 597 203	-0.003 040 48
39	-0.000 800 694	-0.000 563 030	-0.000 779 846	-0.003 782 53
37	-0.000 897 018	-0.000 784 127	-0.000 889 490	-0.004 120 24
35	-0.000 972 469	-0.001 698 510	-0.000 969 517	-0.003 319 47
33	-0.000 929 002	-0.001 556 140	-0.001 005 530	-0.002 914 48
31	-0.001 028 210	-0.001 640 350	-0.001 242 570	-0.002 761 50
29	-0.000 987 339	-0.002 280 000	-0.001 215 990	-0.002 840 59
27	-0.000 972 012	-0.001 843 430	-0.001 138 880	-0.003 888 93
25	-0.001 065 630	-0.002 029 130	-0.001 158 650	-0.003 290 83
23	-0.000 929 012	-0.002 306 440	-0.001 106 270	-0.003 284 29
21	-0.000 846 617	-0.002 094 660	-0.000 976 540	-0.003 075 11
19	-0.000 834 457	-0.001 191 690	-0.001 010 500	-0.003 153 33
17	-0.000 838 631	-0.001 217 300	-0.000 970 785	-0.003 824 53
15	-0.000 799 421	-0.000 929 247	-0.000 865 736	-0.002 764 48
13	-0.000 795 561	-0.000 887 891	-0.001 027 250	-0.003 047 55
11	-0.000 785 297	-0.000 881 493	-0.000 983 558	-0.003 614 42
9	-0.000 895 060	-0.001 058 630	-0.000 717 580	-0.003 758 75
7	-0.000 918 152	-0.001 220 190	-0.000 377 774	-0.004 512 55
5	-0.000 921 907	-0.002 549 630	-0.003 130 820	-0.009 286 00
3	-0.000 797 360	-0.008 268 880	-0.012 942 800	-0.034 283 80

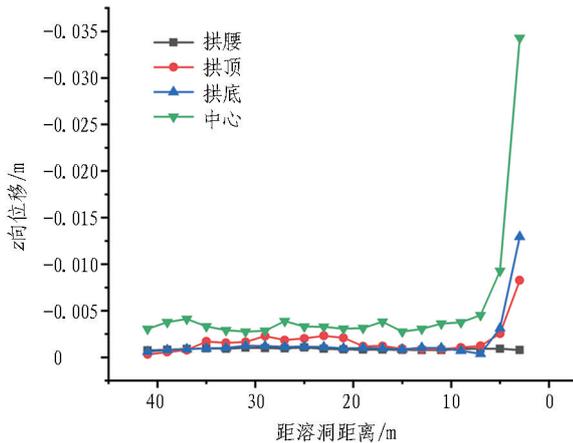


图 11 监测点处位移随开挖进程的变化曲线

Fig. 11 Changing curves of displacement of monitoring point with excavation process

### 3.2 破裂状态分析

由监测点位移分析结果显示, 掌子面距溶洞 7 m 是位移的突变点, 为隔水岩体的安全厚度, 下面将重点研究该部分隔水岩体的破裂状态。隔水岩体随掌子面推进的破裂面状态如图 12 所示。未开挖时, 隔水岩体相对完整, 无明显破裂面; 在距溶洞 17 m 时, 开挖引起的应力重分布逐渐对岩体造成损伤, 出现少量分散型破裂面, 且随着掌子面的推进逐渐增多; 至距溶洞 7 m 时, 隔水岩体已产生大量破裂面, 呈放射状分布。

根据上述分析结果, 建立破裂度统计研究区域 30 m×20 m×7 m, 如图 12(a) 的红框所示。为分析开挖对研究区域的位移扰动, 设立监测点于距溶洞 3 m 的掌子面中心。研究区域破裂度和监测点的 z 向位移随开挖进程的变化曲线如图 13 所示。

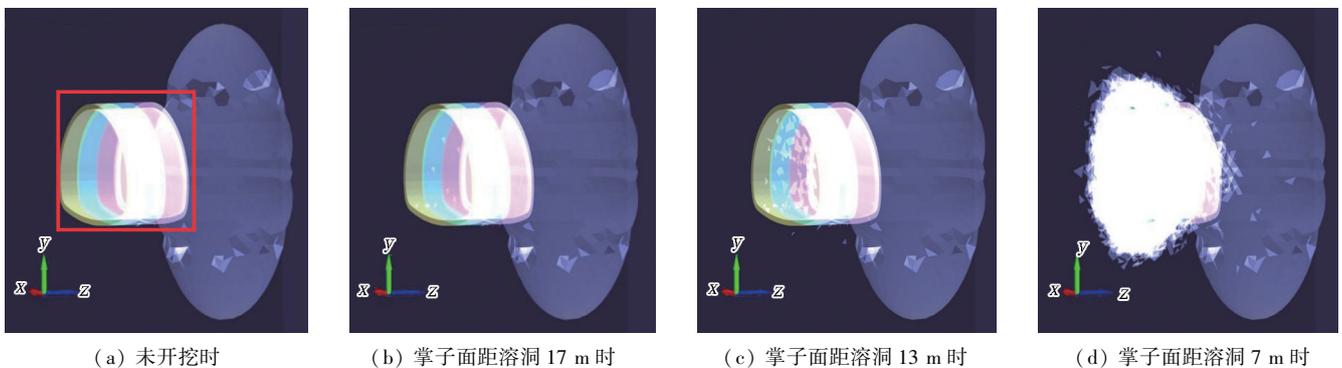


图 12 隔水岩体随掌子面推进的破裂面状态

Fig. 12 Fracture surface state of water-resistant rock mass with advancing of tunnel face

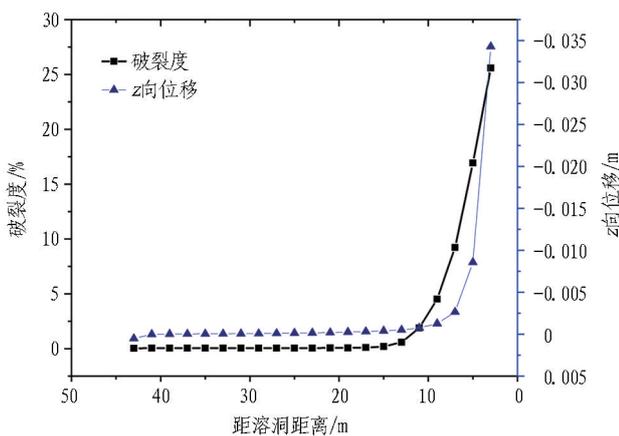


图 13 破裂度和监测点 z 向位移随开挖进程变化曲线

Fig. 13 Changing curves of fracture degree and z-directional displacement of monitoring point with progressing excavation

计算结果显示:

1) 破裂度和位移曲线均有突变点, 分为 2 阶段。突变点左边为开挖影响较弱区, 二者变化均很小; 突变点右边为开挖影响强烈区, 破裂度和位移均迅速增加。

2) 从突变点开始, 破裂度和位移均呈先缓慢增加后迅速增加, 说明开挖引起的应力重分布对隔水岩体的损伤是逐渐加剧的, 灾变过程发生前有孕育阶段。

3) 破裂度突变点左边, 破裂面占比小于 1%, 呈零星分布, 此时隔水岩体处于微损伤阶段, 如图 12(b) 和图 12(c) 所示; 突变点右边, 破裂面占比快速增加, 呈放射状, 掌子面处破裂面数量大于溶洞, 失稳始发于掌子面。

4) 破裂度突变点早于位移突变点 6 m, 说明隔水岩体破裂度达到一定程度后才会引起灾变, 位移突变是灾变的表征现象。

5) 距溶洞 7 m 处的破裂度约为 8%, 5 m 处的破裂度约为 14%, 结合位移监测曲线可知, 破裂度为 8% 时岩体损伤已处于临界状态。

### 3.3 不同水压下隔水岩层的破裂特征分析

当溶洞水压分别为 1、2、3 MPa 时, 不同水压下监测点 z 向位移和破裂度随开挖进程变化曲线如图 14 和图 15 所示。计算结果显示:

1) 不同水压作用下的破裂度突变点都在距离溶

洞13 m处。突变点左边破裂度基本无变化;突变点右边,水压越大,破裂度增大,但增幅较小,说明此种工况下水压对隔水岩层破裂状态的影响不大。

2)不同水压作用下监测点位移的突变点都在距溶洞7 m处,突变点左边位移相对稳定,水压对远端位移的影响很小;突变点右边,水压越大,位移增幅越大,因此,可认为3种水压下的安全厚度均为7 m。

3)不同水压下破裂度突变点均早于位移突变点6 m;在突变点右边,二者均先缓慢增加后迅速增加。

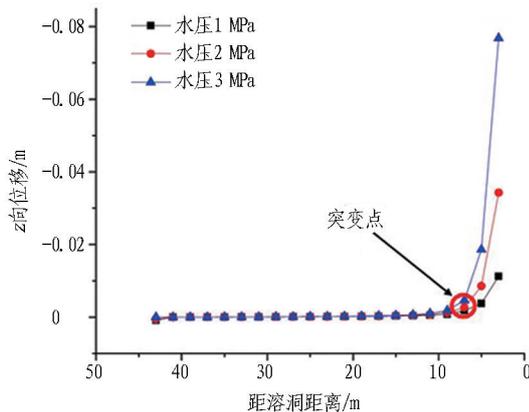


图14 不同水压下监测点 $z$ 向位移随开挖进程变化曲线

Fig. 14 Changing curves of  $z$ -directional displacement of monitoring point with excavation process under different water pressures

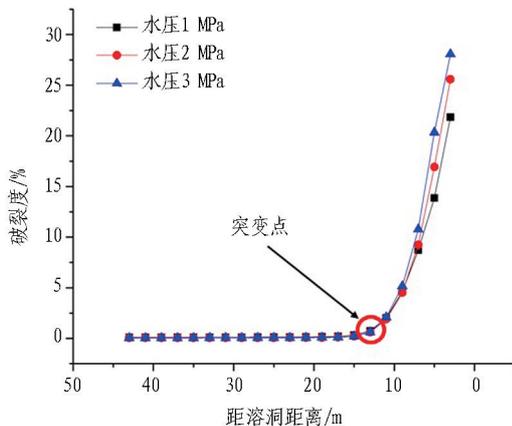


图15 不同水压下破裂度随开挖进程变化曲线

Fig. 15 Changing curves of fracture degree with excavation process under different water pressures

#### 4 结论与建议

传统数值方法仅能模拟岩体的单一状态,且受软件本身计算能力的影响,以溶洞的空间二维分布形态为主,精度较差,计算耗时多。本文采用能够模拟隔水岩体渐进破坏的数值分析软件 GDEM-DAS,辅助以 GPU(显卡)加速,建立了百万网格的三维隧道数值模型,通过计算界面上弹簧的强度,模拟了隔水岩体的渐

进破坏过程。通过监测掌子面的位移演化规律,获得隔水岩体的安全厚度,并利用算法的优势提出了定量描述岩体渐进破坏过程的无量纲指标——破裂度,分析了不同水压下隔水岩体的破裂度演化规律,以及与位移之间的对应关系。主要结论和建议如下:

1)突水为隔水岩体从裂纹萌生到贯通直至碎裂的渐进破坏过程,位移突变是破裂到灾变状态的表征现象。

2)本文给定的计算工况下,溶洞水压为1、2、3 MPa时隔水岩体的安全厚度均为7 m,由此可见溶洞水压非影响隔水岩体稳定性的首要因素,需结合围岩强度、地应力特征、溶洞大小、隧道跨度和埋深等其他因素进行分析。

3)由于地质体本身的非均匀性、非连续性,现场监测所得的地表位移和勘察数据大都是表面的、局部的,很难获取岩体内部复杂的破裂状态和真实的材料参数,由此开展的岩体稳定性计算的可靠性大大降低。因此,可考虑将地表位移监测结果、地表破裂状态与数值模拟结合,通过数值计算结果修正关键参数,获得与现场观测最为接近的一组数据作为材料的当前参数,并进一步计算地应力场和隔水岩体破裂状态,得到当前破裂面积,从而开展对隔水岩体危险程度的量化评价。

本文仅针对均质围岩开展了隧道全断面的开挖模拟,未考虑岩体结构的复杂性和开挖方式的多样性,以及流固耦合作用的影响,具有一定的局限性。后续将分别针对节理裂隙隔水岩体破坏模式和溶洞水入渗诱发的隔水岩体渐进破坏效应开展进一步研究。

#### 参考文献(References):

- [1] 魏星,沈乐,陶志平. 富水软岩隧道突泥塌方及地层沉降的模型试验[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2291.  
WEI Xing, SHEN Le, TAO Zhiping. Model test studies of collapse and settlement of tunnel in saturated soft rocks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2291.
- [2] 赵瑜,李晓红,顾义磊,等. 高应力区隧道围岩变形破坏的数值模拟及物理模拟研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊): 393.  
ZHAO Yu, LI Xiaohong, GU Yilei, et al. Numerical simulation on deformation and failure of surrounding rock in high in-situ stress and its verification in physical model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(S): 393.
- [3] 李浪,戎晓力,王明洋,等. 深长隧道突水地质灾害三

- 维模型试验系统研制及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(3): 491.
- LI Lang, RONG Xiaoli, WANG Mingyang, et al. Development and application of 3D model test system for water inrush geohazards in long and deep tunnels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(3): 491.
- [4] YANG Weimin, YANG Xin, FANG Zhongdong, et al. Model test for water inrush caused by karst caves filled with confined water in tunnels[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2019, 12(24): 749.
- [5] 李集, 卢浩, 夏沅谱, 等. 岩溶隧道防突安全厚度研究综述及估算方法探讨[J]. 隧道建设, 2014, 34(9): 862.
- LI Ji, LU Hao, XIA Yuanpu, et al. Survey and research on estimation method of against-inrush safe thickness of rock strata in karst tunnels [J]. Tunnel Construction, 2014, 34(9): 862.
- [6] 李利平, 李术才, 张庆松. 岩溶地区隧道裂隙水突出力学机制研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 523.
- LI Liping, LI Shucui, ZHANG Qingsong. Study of mechanism of water inrush induced by hydraulic fracturing in karst tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 523.
- [7] 郭佳奇, 乔春生, 曹茜. 侧部高压富水溶腔与隧道间岩柱安全厚度的研究[J]. 现代隧道技术, 2010, 47(6): 10.
- GUO Jiaqi, QIAO Chunsheng, CAO Xi. Research on safe thickness of rock pillar between the tunnel and adjacent karst cave with pressurised water [J]. Modern Tunnelling Technology, 2010, 47(6): 10.
- [8] 郭佳奇, 李宏飞, 陈帆, 等. 岩溶隧道掌子面防突厚度理论分析[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(5): 1373.
- GUO Jiaqi, LI Hongfei, CHEN Fan, et al. Theoretical analysis on water-resisting thickness of karst tunnel face[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(5): 1373.
- [9] YANG Zihan, ZHANG Jiahua. Minimum safe thickness of rock plug in karst tunnel according to upper bound theorem [J]. Journal of Central South University, 2016, 23(9): 2346.
- [10] KUMAR P. Infinite elements for numerical analysis of underground excavations[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2000, 15(1): 117.
- [11] 李术才, 朱维申, 陈卫忠, 等. 弹塑性大位移有限元方法在软岩隧道变形预估系统研究中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 466.
- LI Shucui, ZHU Weishen, CHEN Weizhong, et al. Application of elasto-plastic large displacement finite element method to the study of deformation prediction of soft rock tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4): 466.
- [12] 余健, 何川. 软弱围岩段隧道施工过程中围岩位移的三维弹塑性数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 623.
- SHE Jian, HE Chuan. 3D elastoplastic numerical simulation of surrounding rock displacement in soft surrounding rock section during construction process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 623.
- [13] 谢海文, 高杨. 基于离散单元法隧道开挖裂隙扩张及渗流特性预测[J]. 中外公路, 2017, 37(5): 210.
- XIE Haiwen, GAO Yang. Prediction of fracture expansion and seepage characteristics of tunnel excavation based on discrete element method [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017, 37(5): 210.
- [14] 黄明利, 王飞, 路威, 等. 隧道开挖诱发富水有压溶洞破裂突水过程数值模拟[J]. 中国工程科学, 2009, 11(12): 93.
- HUANG Mingli, WANG Fei, LU Wei, et al. Numerical study on the process of water inrush in karst caves with hydraulic pressure caused by tunnel excavation [J]. Engineering Sciences, 2009, 11(12): 93.
- [15] 徐长金, 樊浩博, 赖金星. 溶洞对岩溶隧道稳定性影响的数值模拟分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2013, 9(6): 175.
- XU Changjin, FAN Haobo, LAI Jinxing. Numerical simulation analysis of influence of karst cave on stability of karst tunnel [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Application Technology), 2013, 9(6): 175.
- [16] 雷霆, 关欣, 洪帆, 等. 顶部溶洞水压对隧道突涌水灾害影响的数值分析[J]. 隧道建设, 2017, 37(2): 167.
- LEI Ting, GUAN Xin, HONG Fan, et al. Numerical analysis of influence of water pressure of overlying karst cave on tunnel water inrush [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(2): 167.
- [17] 李红卫. 溶洞对贵阳轨道交通工程隧道影响的数值分析[J]. 土木工程与管理学报, 2017, 34(4): 24.
- LI Hongwei. Numerical simulation of the influence of cave on Guiyang railway tunnel [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2017, 34(4): 24.
- [18] SHAN Renliang, ZHANG Xiaonan, LU Man. Numerical application of safe thickness between a tunnel and surrounding concealed caves [J]. Geotechnical and

- Geological Engineering, 2018, 36(2): 95.
- [19] 冯春, 李世海, 姚再兴. 基于连续介质力学的块体单元离散弹簧法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊1): 2690.  
FENG Chun, LI Shihai, YAO Zaixing. Study of block-discrete-spring method based on continuum mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 2690.
- [20] 王杰, 李世海, 周东, 等. 模拟岩石破裂过程的块体单元离散弹簧模型[J]. 岩土力学, 2013, 34(8): 2355.  
WANG Jie, LI Shihai, ZHOU Dong, et al. A block-discrete-spring model to simulate failure process of rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(8): 2355.
- [21] MA Zhaosong, FENG Chun, LIU Tianping. A GPU accelerated continuous-based discrete element method for elastodynamics analysis [C]//Key Engineering Materials and Computer Science. [S.l.: s. n.], 2011.
- [22] 彭良田, 卢平, 杨田, 等. 基于连续非连续方法的铁路隧道衬砌承压能力分析[J]. 重庆大学学报, 2019, 42(11): 98.  
PENG Liangtian, LU Ping, YANG Tian, et al. Research on anti-water pressure capability of railway tunnel lining by continuous-discontinuous element method [J]. Journal of Chongqing University, 2019, 42(11): 98.
- [23] 冯春, 李世海, 郑炳旭, 等. 基于连续-非连续单元方法的露天矿三维台阶爆破全过程数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(2): 107.  
FENG Chun, LI Shihai, ZHENG Bingxu, et al. Numerical simulation on complete process of three-dimensional bench blasting in an open-pit mine based on CDEM [J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(2): 107.
- [24] 闫由之. 基于 CDEM 的洒勒山高速远程滑坡过程模拟[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.  
YAN Youzhi. Process simulation of saleshan high-speed long-range landslide based on CDEM [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.
- [25] 赵明阶, 刘绪华, 敖建华, 等. 隧道顶部岩溶对围岩稳定性影响的数值分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 445.  
ZHAO Mingjie, LIU Xuhua, AO Jianhua, et al. Numerical analysis of influence of karst caves in top of tunnel on stability of surrounding of rock masses [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(3): 445.

## 世界工程量和建设规模第一的公路隧道—— 秦岭天台山隧道在陕西贯通

2020年12月28日,宝鸡至坪坎(宝坪)高速公路秦岭天台山特长隧道贯通,这是目前工程量和建设规模居世界第一的公路隧道,刷新了中国高速公路多车道隧道建设的历史纪录。

宝坪高速公路是国家高速公路银昆线(G85)的组成路段,也是陕西省“2367”高速公路网宝鸡至汉中高速公路的重要组成部分,在陕西省“十三五”在建高速公路中规模最大、建设标准最高、施工难度最大。路线全长73.238 km,采用双向6车道高速公路标准,共有桥梁52座、隧道16座,概算投资129亿元。

全线控制性工程——总长32 km的秦岭天台山超长隧道群,自北向南穿越秦岭山脉主脊,桥隧占比达98.1%,为超长距离连续纵坡隧道群。其中,秦岭天台山特长隧道全长15.56 km,总投资34.13亿元,为双向6车道分离式隧道。该隧道最大埋深973 m,相当于深入地下314层楼高;施工中钢材用量达5.6万t,相当于8座埃菲尔铁塔;混凝土用量达126万m<sup>3</sup>,相当于21个“水立方”;出渣量约517万m<sup>3</sup>,按照高度1 m折算,相当于723个标准足球场的面积。它是目前国内项目难度最大、科技含量最高的高速公路隧道工程,具有“超长、多车道、长纵坡、高桥隧比、大埋深、生态敏感”等显著特征。

为缩短建设工期、确保施工安全,自工程启动以来,参建单位全线推广应用三臂凿岩台车、拱顶带模注浆技术等“四新技术”13项,其中7项为陕西省高速公路建设中首次应用,有力提升了工程建设质量和安全管理水平。2020年,依托秦岭天台山超长隧道群创建的安全绿色科技示范工程获交通运输部立项批复,成为陕西省首个交通科技示范类工程。

秦岭天台山特长隧道的顺利贯通,对完善国家高速公路网布局、加强关中和陕南地区沟通与交流、推进新一轮西部大开发和“一带一路”建设以及促进关天、成渝2大经济区合作交流,推进秦巴山区脱贫攻坚和新丝绸之路经济带建设具有重要意义。

(摘自 新华网 [http://m.xinhuanet.com/sn/2020-12/29/c\\_1126919938.htm](http://m.xinhuanet.com/sn/2020-12/29/c_1126919938.htm))