

# 深部试验隧洞围岩脆性破坏及数值模拟

张传庆<sup>1</sup>, 冯夏庭<sup>1</sup>, 周辉<sup>1</sup>, 张春生<sup>2</sup>, 吴世勇<sup>3</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国水电顾问集团 华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014; 3. 二滩水电开发有限责任公司, 四川 成都 610021)

**摘要:** 围岩破坏模式和机制的深入认识和把握、围岩破坏程度的合理评价对于深部地下工程围岩稳定性的分析和调控至关重要。锦屏二级水电站深部地下试验隧洞即为针对该问题而建设的国际上埋深最大(2 500m)的地下试验隧洞之一。通过大理岩室内试验结果的分析, 深入研究和认识大理岩基本工程力学特性。基于此, 分析试验洞开挖后围岩的破坏模式和机制, 应用脆性岩体本构模型(RDM)、数值模拟方法和 FAI 评价方法分析开挖后围岩脆性破坏的范围和深度, 并与现场揭露情况进行对比。分析结果较好地体现高应力条件下大理岩的脆性破坏特征, 达到对围岩破坏程度合理把握的目的, 为引水隧洞开挖期间支护参数的设计和施工处理措施的制定奠定坚实的基础。

**关键词:** 隧道工程; 深埋隧洞; 脆性破坏机制; 数值模拟

**中图分类号:** U 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2010)10 - 2063 - 06

## BRITTLE FAILURE OF SURROUNDING ROCK MASS IN DEEP TEST TUNNELS AND ITS NUMERICAL SIMULATION

ZHANG Chuanqing<sup>1</sup>, FENG Xiating<sup>1</sup>, ZHOU Hui<sup>1</sup>, ZHANG Chunsheng<sup>2</sup>, WU Shiyong<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. East China Investigation and Design Institution, China Hydropower Engineering Consulting Group Co., Hangzhou, Zhejiang 310014, China; 3. Ertan Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610021, China)

**Abstract:** The brittle failure modes and mechanism of surrounding rocks should be studied and understood primarily. Furthermore, the rational evaluation of the brittle failure degree is crucial importance for stability analysis and control of surrounding rock mass in deep underground engineering. The test tunnels in Jinping II Hydropower Station are exactly constructed for these problems, the buried depth of 2 500 m is the maximum in the world. Based on the analysis of the experimental results, the engineering mechanical features of the marble T<sub>2b</sub> are studied. Then the failure modes and mechanism of the surrounding rock mass in the test tunnels are analyzed. And the range and depths of the failure zone in the test tunnels are calculated by numerical simulation method in which the constitutive model, RDM, for hard brittle marble and the FAI evaluation method are adopted. Finally, comparison between the calculated results and those revealed in the test tunnels is carried out. And the results obtained through comparison are satisfied. This study lays the solid foundation for the design of support parameters and establishment of the constructing measures in the excavation process of the diversion tunnels in this project.

**Key words:** tunnelling engineering; deep tunnels; brittle failure mechanism; numerical simulation

**收稿日期:** 2010 - 05 - 12; **修回日期:** 2010 - 06 - 01

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB732006); 国家自然科学基金资助项目(50709037, 50979104)

**作者简介:** 张传庆(1977 - ), 男, 博士, 2006年于中国科学院武汉岩土力学研究所获博士学位, 现任副研究员, 主要从事深部地下工程围岩安全与调控方面的研究工作。E-mail: cqzhang@whrsm.ac.cn

# 1 引言

在深埋高应力条件下，硬脆性岩体表现出与浅埋低应力条件下完全不同的力学行为，剥落、岩爆等为这类岩体的主要破坏模式。同时，围岩内部将发育一定深度的破裂损伤区，并随着表层围岩的破坏而向深部发展。研究认为，围岩的破坏模式与围压有着密切的关系，表层低围压条件下，以劈裂拉伸破坏为主，而随着围压的提高，逐渐转变为以剪切破坏机制为主。只有充分认识了围岩在不同条件下的破坏模式、理解并把握了其破坏机制，才能制定出相应的调控措施。但工程实践表明，只有通过大量的室内和现场试验成果分析并结合先进的分析手段才能较好地实现这一目标。

对于高应力下硬脆性岩体的破坏模式和机制，国际上最具有代表性的是加拿大原子能有限公司(AECL)地下试验室(URL)开展的相关研究工作。其中，在420 m水平布置的多条试验隧洞在开挖过程中均形成了V型剥落区，这被认为是典型的高应力作用下围岩脆性破坏的现象。C. D. Martin<sup>[1, 2]</sup>通过花岗岩的室内常规三轴加卸载试验研究了其变形破坏机制。V. Hajiabdolmajid等<sup>[3, 4]</sup>在前者试验成果的基础上，通过深入剖析脆性岩石的强度参数随损伤发展的演化规律，提出了CWFS(黏聚力弱化-摩擦强化)本构模型，很好地描述了花岗岩的脆性破坏行为，并通过数值模拟再现了V型破坏区的形成。另外，M. Cai等<sup>[5-8]</sup>等从不同的角度对花岗岩的脆性破坏形式开展了研究工作。

锦屏二级水电站引水隧洞横穿锦屏山，最大埋深达到2 525 m，隧洞沿线80%的岩层为大理岩，约3 km以上洞段埋深超过2 000 m<sup>[9]</sup>。辅助洞与引水隧洞平行布置，且已经于2008年8月份贯通。在深埋高地应力环境中，辅助洞开挖过程中揭露出了大量的大理岩脆性破坏现象，并给工程设计和施工带来了很大的挑战。为了深入研究高应力下大理岩的脆性破坏特征和机制，为支护设计参数和开挖方案奠定基础，在辅助洞沿线不同埋深处布置了4个试验洞，每个试验洞包括几条不同方向的试验支洞。其中，2<sup>#</sup>试验洞埋深约2 500 m，埋深和应力水平超过加拿大的地下试验室，开挖过程中揭露出了明显的围岩脆性破坏现象。本文在研究大理岩基本力学特性的基础上，分析试验支洞围岩的破坏模式和机制，应用脆性岩体本构模型(RDM)、数值模拟方

法和FAI评价方法分析开挖后围岩脆性破坏的范围和深度，并与现场揭露情况进行对比，以期更好地达到对其在高应力条件下脆性破坏特征、破坏程度把握的目的。

# 2 深部地下试验洞概况

锦屏二级水电站2<sup>#</sup>试验洞位于锦屏山埋深2 500 m处辅助洞A的南侧，包括2<sup>#</sup>连接支洞、2<sup>#</sup>试验支洞、试验支洞C、试验支洞E共4条试验隧洞。图1为2<sup>#</sup>试验洞各支洞平面布置及断面尺寸，其中，辅助洞A轴线与2<sup>#</sup>连接支洞正交，且二者断面尺寸相同，试验支洞C和E的断面尺寸相同，2<sup>#</sup>试验支洞在东侧拱肩布置了一条矩形槽，如图1(d)所示。

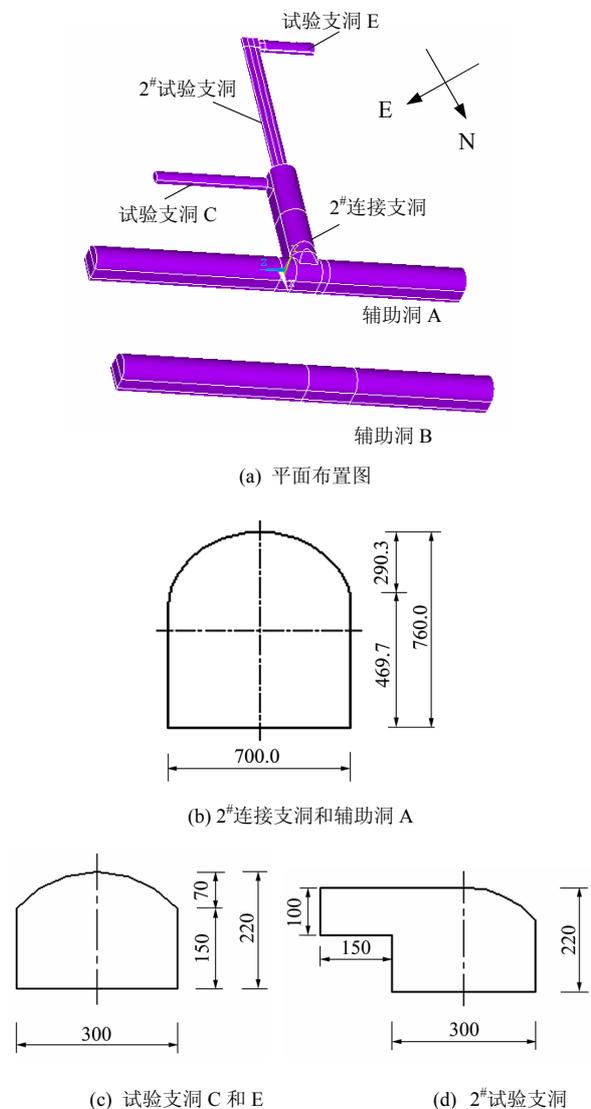


图1 2<sup>#</sup>试验洞各支洞平面布置及断面尺寸(单位: cm)  
Fig.1 Plane layout and cross-section dimensions of branch tunnels in test tunnel #2(unit: cm)

整个试验洞均处于 T<sub>2b</sub> 大理岩中, 且该处岩体结构完整, 结构面稀疏, 揭露出的结构面多为闭合刚性结构面, 面平直无填充物, 未揭露断层。

隧洞工程区地应力场的基本规律通过区域地质构造分析获得, 而地应力的大小和方向则采用基于辅助洞沿线地应力测试成果、围岩脆性破坏的统计规律、不同方向钻孔的岩芯饼化现象等多源信息, 采用多元回归方法、数值模拟、赤平投影分析和迭代分析等多技术手段获得。该洞段以垂直应力为主, 并具有较高的构造应力, 中间主应力近似平行隧洞轴线方向, 最小主应力近似与辅助洞轴线垂直。该处地应力场与 C. D. Martin<sup>[1]</sup>中地下试验室的地应力场有着明显的不同, 主应力差值小是其主要特点, 最大、中间和最小主应力分别为 66.5, 51.2 和 46.3 MPa, 最大和最小主应力比值为 1.4, 这决定了该处试验隧洞不可能出现明显的 V 型破坏区。

### 3 大理岩基本力学特性及本构模型

为掌握大理岩的破坏模式和机制, 本课题组开展了大量的室内常规三轴试验研究。T<sub>2b</sub> 大理岩不同围压下典型应力 - 应变曲线如图 2 所示, 由图 2 可知, 在低围压下, 大理岩表现为明显的脆性变形特征。此时, 岩样以劈裂破坏为主, 宏观裂纹沿加载轴扩展, 破裂面粗糙不平, 拉伸破坏机制起主导作用, 但也存在剪切作用形成的楔形体。不同围压下大理岩的破坏模式如图 3 所示。

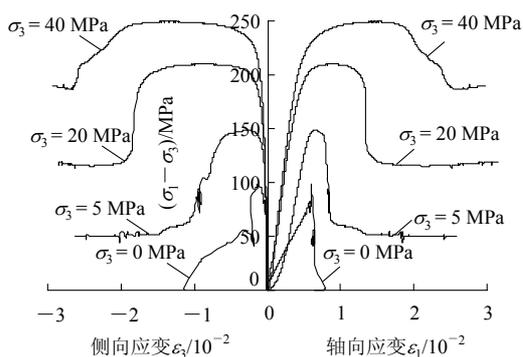


图 2 常规三轴试验典型应力 - 应变曲线  
Fig.2 Typical stress-strain curves obtained from the conventional triaxial experiments

随着围压的升高, 应力 - 应变曲线在峰值强度附近由线性向非线性转变, 并出现平台, 且围压越高平台宽度越大, 强度峰值残差逐渐减小。这些现象表明, 此时岩样的变形开始出现延性特征。低围



(a) 拉伸破坏 (b) 细观拉伸、宏观剪切破坏 (c) 剪切破坏

图 3 不同围压下大理岩的破坏模式

Fig.3 Failure types of marble at different confining pressures

压下的劈裂破坏形式逐渐消失, 与加载方向成一定角度的单破裂面形成。在围压相对较低时, 破裂面上粗糙, 存在小的陡坎, 说明在此围压作用下大理岩呈现细观拉伸破坏、宏观剪切破坏的特点; 而当围压较高时, 破裂面较平整, 存在薄层细岩粉, 说明在剪切破坏的主导作用下, 细观形成的陡坎已被磨平。

在高围压(40 MPa)作用下, 应力 - 应变曲线表现出了近似理想弹塑性曲线的特征, 此时破坏的岩样上未发现明显的破裂面, 而出现密集的共轭滑移线, 岩样呈鼓状, 显然, 这是剪切破坏机制主导作用的结果。大理岩由低围压到高围压破坏现象及机制的转变如图 3 所示(转变顺序为从左向右)。

由以上破坏机制的研究可知, 脆性大理岩在破坏时多表现为细观上的拉裂纹, 并由于围压的不同发育成宏观上的劈裂破坏面或剪切破坏面。拉裂纹的发育意味着岩样黏聚力的降低, 而剪切破坏的出现则意味着摩擦机制发挥作用。但 C. D. Martin 等<sup>[1, 3]</sup>研究认为, 岩样中黏聚力和摩擦因数并非如传统的应变软化模型所认为的二者同时起作用并随着损伤发展同时降低, 而是黏聚力最先发挥作用并随着损伤发展迅速降低, 摩擦强度的发挥则滞后于黏聚力, 并随着损伤的发展而逐渐升高, 即黏聚力弱化 - 摩擦强化(CWFS)。本课题组开展的室内常规三轴加卸载试验结果也证实了这一观点, 如图 4 所示<sup>[10]</sup>, 图 4 中,  $c_{max}$ ,  $\phi_{max}$  分别为岩石变形破裂过程中黏聚力和内摩擦角的最大值, 损伤程度则为岩石等效塑性剪应变与强度残余段起始点对应的等效塑性剪应变之比。同时, 试验还发现大理岩在加载过程中存在弹塑性耦合效应, 为此, 本课题组在 CWFS 模型基础上提出了 RDM 本构模型<sup>[11]</sup>描述脆性大理岩的变形破坏行为。

为了获得该处围岩的力学参数, 本课题组首先以变形和塑性区深度为目标变量进行了参数敏感性

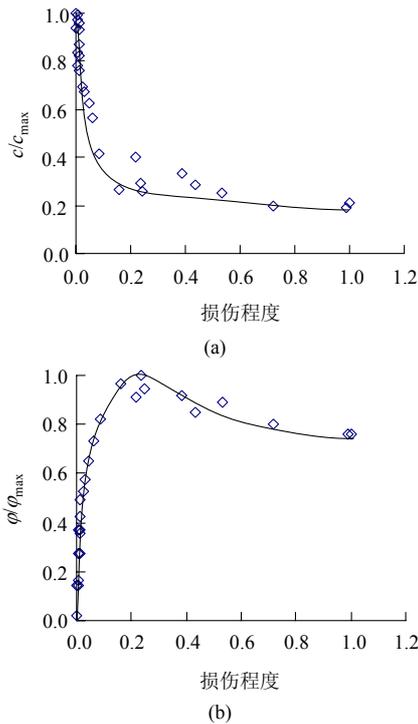


图4 大理岩加卸载试验中黏聚力和内摩擦角的演化规律<sup>[10]</sup>  
 Fig.4 Evolution laws of cohesion and internal friction angle of marble in loading and unloading experiments<sup>[10]</sup>

分析, 确定了依据工程经验可得出的参数和需要反演的参数。然后, 依据辅助洞和引水隧洞开挖过程中的位移监测及松动圈测试成果, 采用智能参数反演方法<sup>[12]</sup>得到了该地层岩体的力学参数, 其主要力学参数见表 1。

表 1 围岩主要力学参数

Table 1 Main mechanical parameters of surrounding rock

弹性模量 $E/GPa$	泊松比 $\nu$	黏聚力/MPa		内摩擦角/(°)	
		初始 $c_0$	残余 $c_r$	初始 $\phi_0$	残余 $\phi_r$
25.3	0.22	20.9	9.1	22.4	42

#### 4 试验隧洞围岩破坏模式及机制

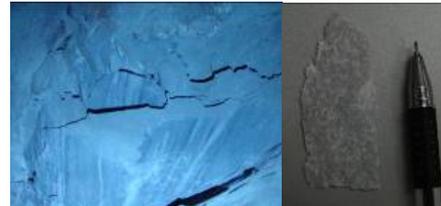
隧洞开挖后, 开挖面上支撑压力的消失导致表层围岩处于零围压状态下, 而由临空面向围岩内部, 围压逐渐升高。由试验结果可知, 围压的变化将导致围岩破坏模式和相应机制的转变。

试验支洞开挖后, 围岩主要的破坏模式是剥落破坏, 但表现为 3 种破坏形态: 一是片状破坏, 二是薄板状破坏, 三是楔形板状破坏, 试验支洞 C 剥落破坏掉落的岩片如图 5(a)所示。

片状破坏主要发育在试验支洞 C 的北侧边墙至拱肩部位, 岩片的厚度由 2 mm 到 2 cm 不等, 厚度



(a) 剥落破坏掉落的岩片



(b) 洞壁的薄片破坏

图 5 试验支洞 C 破坏照片

Fig.5 Failure photos of test branch tunnel C

较均匀, 形状不规则, 落地后破裂成若干碎片, 岩片表面较粗糙, 如图 5(b)所示。该种形式围岩破坏的深度都较小, 洞壁上尚未掉落的薄片幅面相对较大, 有的边缘已经张开, 有的尚未张开, 但都向外鼓起, 敲击有空响声。洞壁高应力集中和低围压导致的劈裂拉伸作用是片状破坏形成的主要机制。

薄板状破坏在 2# 试验支洞中发育最普遍, 岩板厚度范围为 3 cm~0.3 m, 单片板厚度相对均匀, 板幅面较大, 掉落后不易破碎, 有的较平直, 有的则成弧形, 剥落破坏后的洞壁成“龟壳”状, 如图 6 所示。岩板形成机制与岩片相同, 为拉伸破坏。



图 6 2# 试验支洞中的薄板状破坏

Fig.6 Sheet-like failure in test branch tunnel #2

第三种破坏形态为楔形板状破坏, 如图 7 所示, 即剥落的岩体成“石刀”状, 中间厚, 边缘薄, 最大厚度范围为 3 cm~0.1 m, 块度不一, 对应围岩的破坏相对较严重, 剥落深度较大, 在试验支洞中发育最为广泛。剥落破坏后的洞壁呈阶梯状, 常见尚未剥落的边缘成弧形的楔形体和张开错动的裂缝。



图 7 试验支洞 C 中的楔形板状破坏

Fig.7 Wedge-shaped plate failure in test branch tunnel C

与低围压下室内试验所揭示出的岩样破坏机制类似, 这种破坏的主导机制是低围压下的劈裂拉伸破坏, 但局部也存在明显剪切作用的痕迹。

综上可知, 在低围压高集中应力作用下, 完整大理岩体的破坏机制主要为拉伸破坏, 局部存在剪切作用。当然, 这些破坏形态的形成还受到开挖过程中应力路径和应力主轴旋转的影响, 但这并不影响对大理岩脆性破坏模式和机制的认识和理解。

### 5 数值模拟结果与围岩破坏的对比

在对现场围岩破坏模式和机制深入认识的基础

上, 本课题组还对各条试验支洞围岩脆性破坏的深度和范围进行了统计分析, 并以这些信息为基础检验数值模拟结果的准确性, 为将来通过数值模拟分析和评价引水隧洞围岩的稳定性奠定基础。

采用 RDM 本构模型和表 1 中的围岩力学参数, 建立包括 2 条辅助洞、各试验支洞在内的三维洞群模型, 考虑开挖过程的影响, 对该试验洞进行了数值模拟, 并采用 *FAI*(破坏接近度, failure approaching index)指标<sup>[13, 14]</sup>评价围岩的破坏程度。

图 8(a)为模拟得到的试验支洞 C 围岩 *FAI* 分布图, 可见, 围岩破坏( $FAI \geq 2$ )的位置主要发生在北侧边墙至拱肩、南侧边墙, 深度约 0.2 m, 与现场围岩破坏的发育位置和破坏程度相符。但由于实际开挖断面对起拱线处作了平滑处理, 因此, 导致该处计算结果与实际情况存在细微的差别。

在试验支洞 C 洞口处, 由于与 2<sup>#</sup>连接支洞交叉形成应力集中, 造成洞口处围岩破坏较严重, 计算结果则很好地反映了这一问题, 如图 8(b)所示。

2<sup>#</sup>试验支洞东侧的矩形槽造成了局部应力集中, 导致该处围岩脆性破坏非常严重, 如图 9 所示, 计算结果也与现场情况吻合, 但是由于该隧洞单元为四面体, 因此, 造成 *FAI* 分布图在局部出现变异, 但并不影响对围岩稳定性的规律分析与评价。

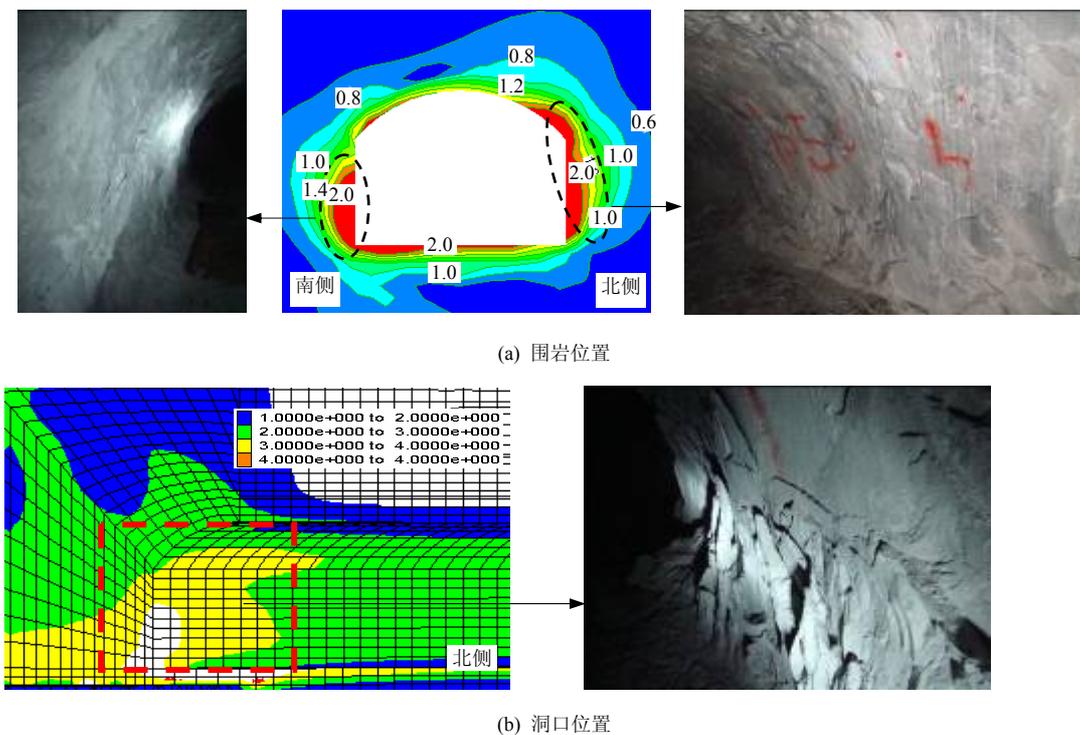


图 8 试验支洞 C 围岩剥落破坏的计算结果与现场现象的对比

Fig.8 Comparisons of calculated results and field phenomena of spalling failure in test branch tunnel C

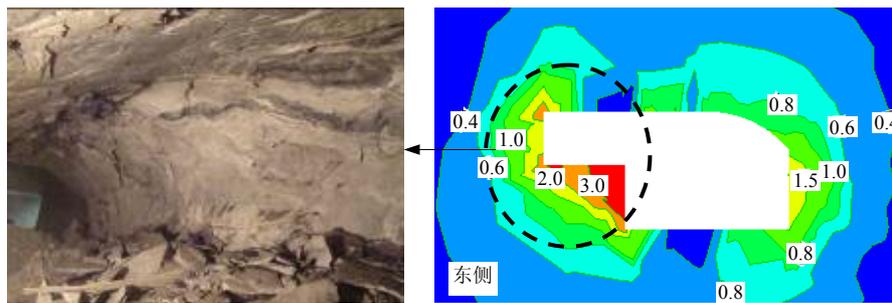
图9 2<sup>#</sup>试验支洞围岩剥落破坏的计算结果与现场现象的对比

Fig.9 Comparisons of calculated results and field phenomena of spalling failure in test branch tunnel #2

## 6 结 论

作为世界上埋深最大的试验隧洞项目之一,锦屏二级水电站辅助洞2<sup>#</sup>科研试验洞的建设对于揭示大理岩脆性破坏特征具有非常重要的意义。通过室内常规三轴加载和加卸载试验,本文对大理岩的应力应变特征、破坏模式和机制随围压的变化规律、强度参数随岩石损伤发展的演化规律进行了深入研究,对试验洞围岩的破坏模式和机制的认识起到了重要的指导作用。在此基础上,本文比较了数值模拟结果与现场围岩脆性破坏情况,以检验地应力、本构模型、力学参数和评价方法等的合理性及对围岩稳定性分析的有效性。主要得到以下几点结论:

(1) 大理岩在低围压下表现为脆性变形特征,并随着围压的升高,应力-应变曲线在峰值强度处出现平台,延性变形逐渐明显,强度峰值残差随之减小。

(2) 从低围压到高围压,由拉伸到细观拉伸-宏观剪切机制,最后转变为纯剪切机制。大理岩的破坏模式由轴向劈裂破坏转变为倾斜的单裂纹破坏,围压升高至一定程度后,岩样破坏时呈鼓状,侧面出现密集滑移线。破坏机制也随着围压变化。

(3) 低围压高集中应力下,剥落为大理岩的主要破坏模式,破坏形态表现为片状、薄板状和楔形板状,主导机制是拉伸破裂,局部存在剪切作用。

(4) 基于数值模拟和 *FAI* 指标的围岩稳定性评价结果与现场围岩脆性破坏的位置和程度均较好地吻合,验证了硬脆性岩体本构模型及相应评价指标的合理性,采用该方法进行引水隧洞围岩稳定性分析和评价是可行的。对于指导支护参数设计和施工处理措施制定具有重要的意义。

### 参考文献(References):

- [1] MARTIN C D. The strength of massive Lac du Bonnet granite around underground openings[Ph. D. Thesis][D]. Manitoba, Canada: University of Manitoba, 1993.
- [2] MARTIN C D. Seventeenth Canadian geotechnical colloquium: the effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(5): 698 - 725.
- [3] HAJIABDOLMAJID V. Mobilization of strength in brittle failure of rock[Ph. D. Thesis][D]. Kingston, Canada: Queen's University, 2001.
- [4] HAJIABDOLMAJID V, KAISER P K, MARTIN C D. Modeling brittle failure of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(6): 731 - 741.
- [5] CAI M, KAISER P K. Assessment of excavation damaged zone using a micromechanics model[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20(4): 301 - 310.
- [6] CAI M, KAISER P K, MARTIN C D. Quantification of rock mass damage in underground excavations from microseismic event monitoring[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(8): 1 135 - 1 145.
- [7] DIEDERICH S, KAISER P K, EBERHARDT E. Damage initiation and propagation in hard rock during tunneling and the influence of near-face stress rotation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(5): 785 - 812.
- [8] EBERHARDT E. Numerical modeling of three-dimension stress rotation ahead of an advancing tunnel face[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(4): 499 - 518.
- [9] 张春生. 混凝土衬砌高压水道的设计准则与岩体高压渗透试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1 305 - 1 311.(ZHANG Chunsheng. Design criteria for concrete-lining high pressure hydropower tunnel and high pressure permeability test on rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7): 1 305 - 1 311.(in Chinese))
- [10] 黄书岭. 高应力下脆性岩石的力学模型与工程应用研究[博士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2008.(HUANG Shuling. Study on mechanical model of brittle rock under high stress condition and its engineering applications[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008.(in Chinese))
- [11] 江 权, 冯夏庭, 陈国庆. 考虑高地应力下围岩劣化的硬岩本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 144 - 152.(JIANG Quan, FENG Xiating, CHEN Guoqing. Study on constitutive model of hard rock considering surrounding rock deterioration under high geostresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 144 - 152.(in Chinese))
- [12] 冯夏庭, 江 权, 苏国韶. 高应力下硬岩地下工程的稳定性智能分析与动态优化[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1 341 - 1 352.(FENG Xiating, JIANG Quan, SU Guoshao. Intergrated intelligent stability analysis and dynamic optimization of underground engineering in hard rock with high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1 341 - 1 352.(in Chinese))
- [13] 张传庆, 周 辉, 冯夏庭. 基于破坏接近度的岩土工程稳定性评价[J]. 岩石力学, 2007, 28(5): 888 - 894.(ZHANG Chuanqing, ZHOU Hui, FENG Xiating. Stability assessment of rock mass engineering based on failure approach index[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(5): 888 - 894.(in Chinese))
- [14] ZHANG C Q, FENG X T, ZHOU H. Statistical analysis on strength of rock based on YAI concept[J]. Key Engineering Materials, 2007, 340 - 341: 1 157 - 1 162.