

# 天然和饱水状态 B 类角砾岩的力学性质及其对地下厂房稳定性的影响

李帅军<sup>1</sup>, 冯夏庭<sup>1</sup>, 徐鼎平<sup>1</sup>, 江 权<sup>1</sup>, 周扬一<sup>1</sup>, 肖云华<sup>2</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. 长江三峡勘测研究院有限公司, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 从现场勘查、室内试验和数值计算的角度对某厂房出露的 B 类角砾岩的岩体特性、力学性质与开挖卸荷后围岩稳定性做系统的分析。室内试验结果表明, 0~15 MPa 围压下 B 类角砾岩表现典型的弹脆塑性; 饱水试样在相对较高围压下加载时, 试样的变形趋于均匀化, 此时弹性模量不再随围压增大而增大。峰值强度的离散性较大, 这是由于试样中方解石含量不同, 随方解石含量增大, 试样峰值强度增大; 饱水状态试样较天然状态下内摩擦角小而黏聚力大, 体现水对角砾岩黏结强度的提高和内摩擦因数的弱化作用; 利用角砾岩区域的三维数值模型计算得到开挖卸荷条件下 B 类角砾岩区域围岩的基本力学响应。计算结果与现场监测数据吻合较好。通过对 B 类角砾岩出露区域系统地加强支护, 确保了施工期角砾岩区域的稳定性。

**关键词:** 岩石力学; B 类角砾岩; 天然和饱水状态; 软化作用; 地下厂房; 围岩稳定性

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2016)08-1530-13

## Mechanical property of B-type breccia under both natural and saturated state and its influence on the stability of underground powerhouse

LI Shuaijun<sup>1</sup>, FENG Xiating<sup>1</sup>, XU Dingping<sup>1</sup>, JIANG Quan<sup>1</sup>, ZHOU Yangyi<sup>1</sup>, XIAO Yunhua<sup>2</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. Three Gorges Geotechnical Consultants Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract:** The field investigation, laboratory experiment and numerical computation were carried out to systematically analyze the B-type breccia from a hydropower station. The laboratory test results indicated that the B-type breccia exhibits typical elasto-brittle-plastic feature under the confining pressures of 0–15 MPa. The specimen deformation tended to be uniform under relatively high confining pressure. Therefore, the elastic modulus had little relationship with the confining pressure. Due to the different calcite contents in the specimens, the peak strengths of the specimens differed markedly. Peak strength increased with the increasement of calcite contents. Compared with natural specimens, the internal friction angle of saturated specimens increased while cohesion decreases, which illustrated that water strengthened the bonding effect and weakened the internal friction coefficient; Three-dimensional numerical model including breccia mass was established. Mechanical response of

**收稿日期:** 2015-09-22; **修回日期:** 2016-02-17

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(11232024); 国家自然科学基金国际合作重大项目(41320104005)

Supported by the Key Project of National Natural Science Foundation of China(Grant No. 11232024) and Major International Cooperation Project National Natural Science Foundation(Grant No. 41320104005)

**作者简介:** 李帅军(1990-), 男, 2013 年毕业于中国矿业大学采矿工程专业, 现为硕士研究生, 主要从事大型地下洞室群围岩稳定性的研究工作。E-mail: lsjun999@163.com

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2015.1314

B-type breccia under excavation was obtained through numerical computation. The numerical computation results fit well with monitoring data. It indicated that the surrounding rock was steady after systematic reinforced support have been set.

**Key words** : rock mechanics ; B-type breccia ; natural and saturated state ; softening effect ; underground powerhouse ; stability of surrounding rock

## 1 引言

角砾岩是碎屑岩的一种，碎屑岩是由各类母岩遭受物理风化(机械破碎)所形成的固体产物，经搬运、沉积、成岩等一系列地质作用而形成的岩石。砾的含量大于 30%且磨圆度极低、分选差、形状各异的碎屑岩称为角砾岩<sup>[1-3]</sup>。由于角砾岩中的角砾颗粒不均匀地镶嵌在杂基及胶结物中，这种物质分布的非均一性可能导致较差的力学性质。角砾岩作为一种性状较为特殊的岩体，在岩石工程中时有揭露，其较差的力学性质给工程围岩稳定性带来安全隐患<sup>[4]</sup>。

目前对角砾岩的研究多集中于地质成因与成矿机制上，而对其力学性质及对工程稳定性影响的认识还不够深入。史明魁等<sup>[5]</sup>论述了火成角砾岩的定义，阐明研究火成角砾岩的意义、研究方法和研究手段；邓建华等<sup>[6]</sup>开展了膏溶角砾岩不同含水率情况下力学特性的研究，得到了不同含水率条件下膏溶角砾岩力学参数的变化规律，且随含水率的增加，膏溶角砾岩的力学性能劣化明显；宋飞等<sup>[7]</sup>对石膏角砾岩的流变特性进行研究，通过室内蠕变试验，建立复合流变力学模型，能较好地描述石膏角砾岩的流变全过程；熊江陵和李建华<sup>[8]</sup>对太行山隧道膏溶角砾岩的地质背景、成因、工程特性进行研究，基于工程特性测试和室内单轴与三轴压缩结果，得到膏溶角砾岩的膨胀特性、基本力学参数和对混凝土的无结晶类腐蚀性，试验结果表明其强度低，常伴溶蚀、孔洞，岩体均匀性差；上述研究成果多基于室内试验分析其力学性质，表明角砾岩较差的力学性质，并未涉及对工程稳定性的研究和评价。

某地下电站主厂房第 I 层局部洞段开挖揭露力学性质较差的 B 类角砾岩。该角砾岩相对于母岩(灰岩)模量及强度均较低，施工期可能产生掉块、塌方等局部安全问题。为科学合理地评价主厂房角砾岩洞段的围岩稳定性，确保主厂房开挖施工期和运行期的安全，有必要对该角砾岩开展相应的工程特性及力学性质研究。为此，开展现场声波测试，刚性承压板试验及天然含水状态(以下简称天然状态)和饱和含水状态(以下简称饱水状态)下室内单轴与常

规三轴压缩试验，以获取现场岩体的力学特性和岩块的力学性质。本文基于现场勘查和以上试验结果，结合左岸主厂房角砾岩区的三维数值计算，得到在现场开挖支护条件下主厂房角砾岩区域开挖后围岩的基本力学响应。通过现场位移监测信息得到 B 类角砾岩区域的稳定性。

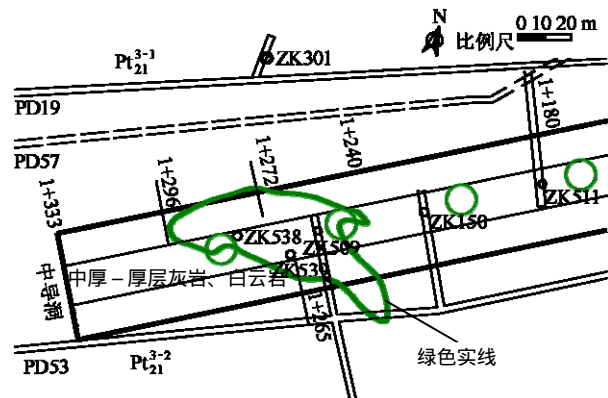
## 2 空间分布与岩体特性

### 2.1 角砾岩空间分布

该主厂房第 I 层中导洞开挖过程中在顶拱揭露分布范围较大的角砾岩，根据角砾性状分为 A 类和 B 类角砾岩。A 类角砾岩，微新，角砾多呈块石或大块石状；B 类角砾岩通常为弱风化~微风化，多呈碎石或块石状<sup>[9]</sup>。B 类角砾岩性状差于 A 类角砾岩，本文针对 B 类角砾岩开展分析研究。B 类角砾岩呈团块状嵌于围岩内，沿轴线呈条带状分布，与主厂房轴线夹角约 28°，主要分布于 5#和 6#机组附近。分布范围顺主厂房轴线最长约 56 m( $Y_C = 1+240 \sim 1+296$ )，垂直厂房轴线方向分布最宽约 33 m ( $X_C = 0+983.75 \sim 1+016.25$ )，铅直方向分布最高约 74 m<sup>[10]</sup>。B 类角砾岩平面分布如图 1 所示，绿色实线所围区域是揭露和勘探的 B 类角砾岩分布区。

### 2.2 岩体特性

按照砾岩的分类<sup>[11]</sup>，该地下厂房出露的 B 类角砾岩属粗粒结构。现场勘查表明，角砾成分通常为灰岩或大理岩化白云岩，角砾大小不等，直径一般数厘米，大者可达 1 m 左右，棱角明显，多混杂排



(a) EL850 m 平切图

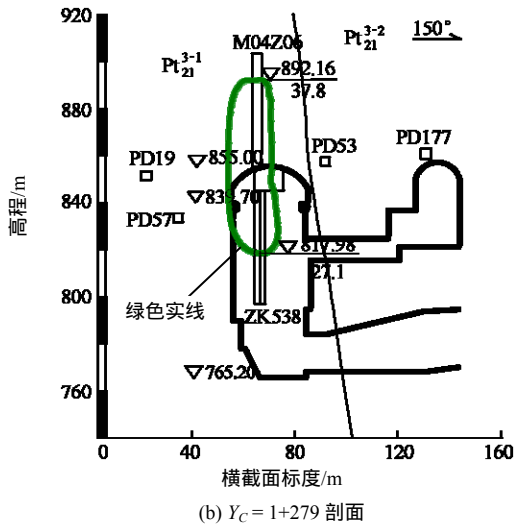


图1 主厂房第1层开挖后B类角砾岩空间分布图  
Fig.1 Spatial distribution of B-type breccia on the opening face of first layer in main powerhouse

列,无定向痕迹。角砾呈弱风化~微风化状,多呈碎石或块石状,角砾含量一般在40%以下。角砾之间呈基底式胶结,胶结较紧密。方解石中局部可见溶蚀小孔洞。开挖揭露的B类角砾岩见图2。



(a)



(b)

图2 左岸主厂房开挖揭露的B类角砾岩  
Fig.2 B-type breccia exposed after excavation in main powerhouse in left bank

### 3 室内试验

地下洞室开挖后,初始地应力场经过调整重新分布,洞周围岩的应力状态由三向转变为两向或单

向受力状态<sup>[12]</sup>。对于洞周一定范围的岩体,地应力调整过程相当于对其沿某一应力路径的加卸载<sup>[13]</sup>。赋存于不同初始地应力场、力学性质不同的岩体开挖后,产生不同程度的力学响应(变形大小不同、松弛深度不同、破坏形式、程度不同等)。为了解B类角砾岩的基本力学性质,获得其加载时的力学响应,开展角砾岩天然状态的单轴和常规三轴压缩试验;考虑地层水渗漏以及施工用水造成的围岩潮湿环境,同时开展饱水试样的单轴和常规三轴试验,为今后围岩稳定性分析和支护设计优化提供可靠的试验数据支撑。

#### 3.1 试样加工

试样取自该主厂房第1层。角砾岩体经过切割、打磨,制成直径50 mm,高度100 mm的圆柱体试样。试样均在中国科学院武汉岩土力学研究所工厂精确加工而成,加工精度满足标准<sup>[14]</sup>要求。由于角砾镶嵌于基质中,且角砾本身黏结强度低,切割加工试样过程中,靠近表面的颗粒不可避免产生损伤,加工完成后个别试样的表面有局部的小凹坑。为保证试样加载过程中试样表面受力均匀,试验前用橡皮泥填满凹坑部位,使试样表面完整。加工完成后共24个试样,编号从1~24,分为2组,每组12个。

#### 3.2 饱水试样的制备

饱水状态的试样采用真空抽气法<sup>[15]</sup>制备。试验装置和试样见图3,4。将编号为1~12的12个试样缓慢放入真空饱和装置中,密封装置后接通真空泵,将其内抽为真空。控制阀门缓慢吸入蒸馏水,直至水面浸没试样。关闭阀门,停止吸入蒸馏水。继续接通真空泵抽放空气,时间不少于4 h。根据压力表读数,装置内保持真空状态。为确保试样达到饱和,试样在真空装置中维持真空状态吸水一个月。



图3 置于真空饱和装置中的试样  
Fig.3 Specimens in a vacuum saturation device



图 4 试样在真空状态下吸水至饱和状态

Fig.4 The specimens absorb distilled water in vacuum until saturated

### 3.3 试验设备和测量方法

试验在中国科学院武汉岩土力学研究所的 MTS815.03 型压力试验机上进行。该试验机配有伺服控制的全自动三轴加压和测量系统，并拥有全数字化控制系统。该试验系统可采用 2 种方法测量试样的轴向变形，即线性可变差动传感器(LVDT)和应变规。LVDT 同时测量垫片和试样的变形，而应变规仅测量试样中部的变形(见图 5)。在峰后由于试样应变局部化<sup>[16-17]</sup>，此时由于应变规测量的范围较小，其测量结果不能准确地反映试样的变形<sup>[18]</sup>，因此轴向应变采用 LVDT 测量。试样的环向变形采用安置在试样中部由链条链接的伸长计进行测量。

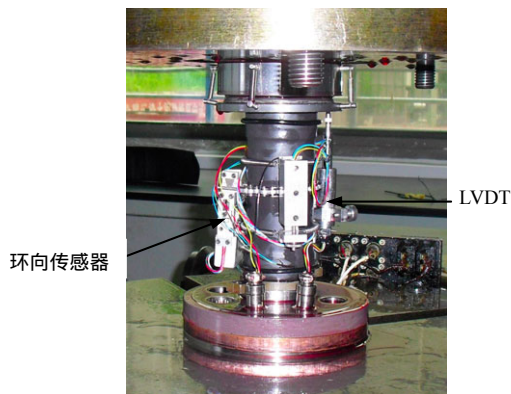


图 5 试样安装与测量系统

Fig.5 Sample assembling and measurement system

每组试样均开展单轴和常规三轴加载试验。根据该地厂范围内初始地应力值及地下厂房开挖后围岩应力重分布的特征，设置常规三轴试验中围压等级分别为 2, 7, 15 MPa，每一围压下分别测试 3 个试样。

制好的试样先进行尺寸量测，用热缩套管包裹好后置于伺服机的承压板上，先施加围压，后以

0.002 mm/s 的轴向位移速率施加轴向荷载，直到试样破坏，同时测量试样的轴向和环向位移，得到试样的轴向荷载 - 轴向位移和轴向荷载 - 环向位移全程曲线。

### 3.4 试验结果

根据角砾岩的单轴和常规三轴加载试验得到轴向荷载 - 轴向位移、轴向荷载 - 环向位移全过程曲线，由试样的几何参数经过计算得到轴向应力 - 轴向应变和轴向应力 - 环向应变曲线。取加载阶段的弹性段，即轴向应力 - 轴向应变峰前近似直线部分，采用割线法，计算得到角砾岩试样在不同围压下天然状态和饱水状态的弹性模量。以下从应力 - 应变全过程曲线和力学参数等方面对试验结果进行分析。

#### 3.4.1 应力 - 应变全过程曲线分析

图 6 为典型试样的轴向应力 - 轴向应变与轴向应力 - 环向应变曲线，实线和虚线分别表示天然和饱水状态试样的应力 - 应变关系。从图 6 可以看出，根据角砾岩的轴向应力 - 轴向应变曲线特征，可以把其划分为 5 个阶段：(1) *OA* 段，孔隙压密阶段，曲线呈上凹型。曲线上凹有两方面原因，一是试样两端面不完全平行平整，加载初期端面调整；另一方面试样自身存在微裂隙，在低围压下微裂隙闭合<sup>[19]</sup>。这一阶段出现在应变比较小的范围，且单轴和低围压下加载此阶段更明显；随初始围压增大，微裂隙在静水压力下被压密，高围压时该阶段不明显；而饱和试样此阶段不明显；(2) *AB* 段，该阶段为弹性变形阶段，应力 - 应变曲线近似直线；(3) *BC* 段，为进入塑性屈服至峰值强度之前的塑性阶段，也有学者称非稳定破裂发展阶段。此阶段应力随应变增长速度放缓，微破裂的发展出现了质的变化<sup>[20]</sup>；笔者的观点倾向于，由于岩石材料的非均质性，加载至 *BC* 段时，试样中局部最弱区域开始屈服，此阶段的非线性是由于屈服区域岩石强度降低以及其他处于弹性阶段试样变形的综合反映<sup>[21]</sup>；(4) *CD* 段，峰后应力跌落阶段，本阶段试样中最弱断面达到承载能力极限而整体弱化，在应变增量较小的范围内轴向应力迅速跌落，随围压增大，斜率(负)增大。该阶段曲线形态是定性了解岩石脆性程度的主要方法<sup>[22]</sup>；(5) *DE* 段，残余强度阶段，此阶段由破裂岩块之间的摩擦力维持试样的承载能力。随轴向应变增长，轴向应力基本不变。反映宏观破裂面在恒定轴压下的剪切滑移。

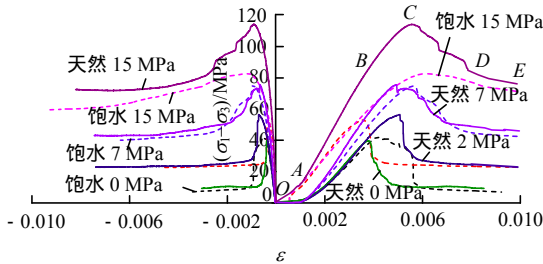


图 6 典型试样的应力 - 应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves for typical specimens

从应力 - 应变全过程曲线形态可以看出, B 类角砾岩表现出明显的弹脆塑性, 随围压和含水量增大, 弹脆塑性向弹塑性过渡。

3.4.2 力学参数

变形体静力学问题中, 力学参数包括强度参数和变形参数<sup>[23]</sup>, 以下针对室内试验结果对 B 类角砾岩的基本力学参数展开讨论。

(1) 峰值强度

不同围压下天然状态和饱水状态试样的峰值强度见图 7。从饱和单轴抗压强度看, 平均为 39.0 MPa, 属较硬岩<sup>[24]</sup>, 但在较硬岩的下限, 偏向较软岩。2 种状态下试样峰值强度均随围压增大而增大, 表现出峰值强度的最小主应力效应, 符合一般认识规律; 单轴压缩和围压 2 MPa 时, 天然和饱水状态试样峰值强度差别不大, 由于试样的离散性, 甚至有的饱水试样强度大于天然状态的试样强度, 体现出试样强度的离散性较大。随围压增大, 饱水状态试样的峰值强度增加幅度较天然状态试样增幅更缓和, 围压越大, 天然状态试样峰值强度高于饱水状态的趋势越明显, 这是由于饱水试样的内摩擦角小于天然状态的试样。不同围压下, 天然和饱水状态试样的峰值强度均值、标准差及变异系数见表 1。

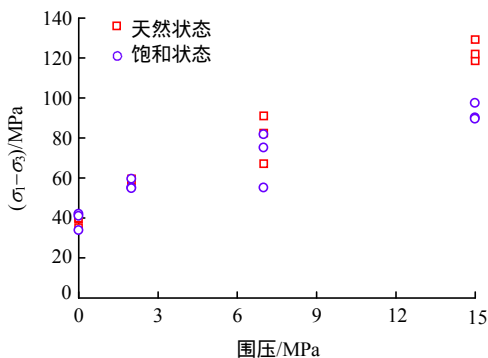


图 7 天然状态和饱水状态试样的峰值强度随围压变化

Fig.7 The peak strength change with confining pressure for natural and saturated specimens

表 1 天然与饱水状态下峰值强度均值、标准差及变异系数  
Table 1 The mean values, standard deviations and variable coefficients of peak strength in natural and water-saturated state

围压/ MPa	天然状态			饱水状态		
	均值/ MPa	标准差/ MPa	变异 系数	均值/ MPa	标准差/ MPa	变异 系数
0	38.18	2.66	0.070 0	39.06	4.45	0.110
2	56.91	0.53	0.009 3	54.61	2.66	0.049
7	73.21	12.10	0.170 0	63.81	13.87	0.220
15	108.24	9.42	0.087 0	74.22	8.63	0.120

(2) 残余强度

不同围压下天然和饱水状态试样的残余强度见图 8。由图 8 可以看出, 残余强度随围压的变化规律与峰值强度类似, 即在相应围压下, 饱水状态试样的残余强度量值均低于天然状态; 天然状态和饱水状态试样残余强度均随围压增大而增大。围压从 0 ~ 2 MPa, 残余强度增大明显, 围压大于 2 MPa 之后, 天然状态和饱水状态试样的残余强度随围压增大基本呈线性增长, 表现出残余强度的最小主应力效应; 饱水状态试样的残余强度增长幅度低于天然状态, 这是由于受水的弱化作用, 饱水试样在峰后的残余内摩擦角小于天然状态试样。不同围压下, 天然和饱水状态试样的残余强度均值、标准差及变异系数见表 2。

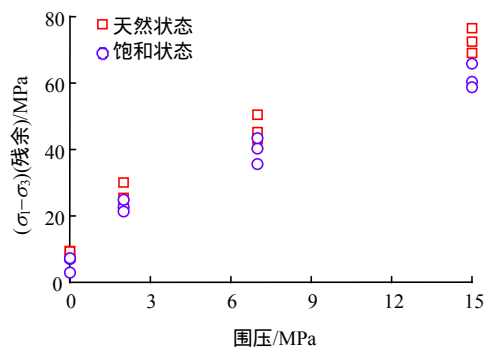


图 8 天然状态和饱水状态试样残余强度随围压的变化关系

Fig.8 The residual strength change with confining pressures for natural water content and saturated specimens

(3) 内摩擦角和黏聚力

有围压时试样均为沿某单一斜面或“X”型共轭面剪切破坏, 符合 Mohr-Coulomb 剪切破坏准则。根据 Mohr-Coulomb 准则得到岩块的内摩擦角和黏聚力见表 3。天然状态下, 初始内摩擦角 43.4°, 饱

表 2 天然与饱水状态下残余强度均值、标准差及变异系数

Table 2 The mean values, standard deviations and variable coefficients of peak strength in natural and saturated state

围压/ MPa	天然状态			饱水状态		
	均值/ MPa	标准差/ MPa	变异 系数	均值/ MPa	标准差/ MPa	变异 系数
0	8.82	1.02	0.120	5.72	2.40	0.420
2	26.19	3.63	0.140	22.92	1.79	0.078
7	46.28	3.80	0.082	39.73	3.95	0.099
15	72.68	3.74	0.052	61.59	3.71	0.060

表 3 天然与饱水状态角砾岩的黏聚力与内摩擦角

Table 3 Cohesions and friction angles of breccia under natural and saturated state

状态	初始内 摩擦角/(°)	初始黏聚 力/MPa	残余内摩 擦角/(°)	残余黏聚 力/MPa
天然状态	43.42	9.18	42.02	3.15
饱水状态	32.31	12.37	39.22	2.72

水状态时为 32.3°，初始内摩擦角降低 25.59%；初始黏聚力从天然状态时的 9.18 MPa 升高到饱水时的 12.37 MPa，升高 34.75%。饱水状态较天然状态下的残余内摩擦角和残余黏聚力分别降低 6.66%和 13.65%。饱水状态较天然状态的试样初始内摩擦角和初始黏聚力分别降低和升高，而残余内摩擦角和残余黏聚力均降低，体现出做承载参数的内摩擦角和黏聚力发挥承载能力的作用机制不同，下文中将对此做详细解释。

(4) 弹性模量

不同围压下天然状态和饱水状态试样的弹性模量见图 9。由图可以看出：相应围压下，饱水状态试样的弹性模量整体上均低于天然状态试样，体现出水对角砾岩的软化作用。对于天然状态的试样，其弹性模量随围压增大而增大，而对于饱水状态试样，当围压大于 2 MPa 时，弹性模量没有明显变化。这也可以由图 6 中轴向应力 - 轴向应变曲线弹性阶段斜率的变化直观得出。当围压从 0 MPa 升高到 2 MPa，试样的弹性模量均有明显升高。

3.5 结果讨论

天然和饱水状态的 B 类角砾岩室内试验结果已在上文阐述，本节对以上试验结果进行讨论，对相关机制进行解释与说明。

3.5.1 应力 - 应变曲线

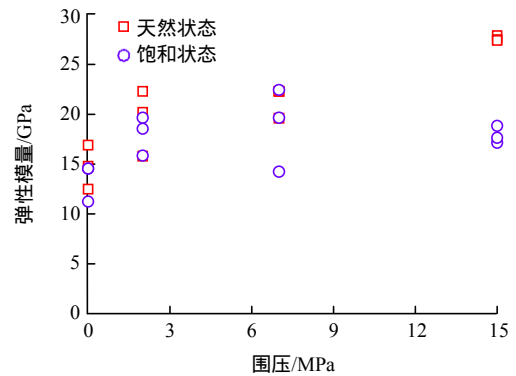


图 9 天然状态和饱水状态试样的弹性模量随围压的变化  
Fig.9 Elastic modulus change with confining pressures for natural and saturated specimens

从天然和饱水状态试样的应力 - 应变曲线看，天然状态试样有明显的压密阶段，而饱水试样在有围压时压密阶段不明显。这是由于饱水试样中矿物吸水后略有膨胀，岩石中微孔隙有所闭合；峰值强度之前，临近峰值的区域，天然状态试样的轴向应力 - 轴向应变曲线呈明显的非线性，而饱水状态的试样加载至临近峰值时，轴向应力仍基本保持随应变线性发展。峰值附近的非线性段表明加载至临近峰值时，由于试样内部角砾与胶结物之间强度和刚度存在差异，试样产生非均匀变形及应力场，试样中最弱部分最先屈服，此时塑性变形发生在最弱断面<sup>[21]</sup>，屈服过程较长。峰值附近的非线性段是最弱断面的塑性变形与其他组分的弹性变形的综合反映。饱水状态试样峰值附近非线性不明显，表明饱水状态下，试样强度分布趋于均匀，加载过程中，试样变形趋于均匀，当加载至临近峰值强度时，试样将同时达到承载能力极限，而并非受某一软弱面的强度控制。

3.5.2 弹性模量

一般弹性模量随围压增大而增大<sup>[21]</sup>，天然状态的试样符合此规律，这是因为天然状态的试样可视为由均质弹性体和若干微裂隙构成。轴向压缩过程中，裂隙之间有摩擦滑移。围压较高时，限制裂隙的滑移，因而试样产生的轴向变形较小，从而具有较高的弹性模量。而对于饱水状态的试样，当围压高于 2 MPa 时弹性模量不再随围压增大而变化，这是由于水饱和的试样，微裂隙有所闭合，试样的力学性质趋于均匀。加载过程中，沿裂隙的剪切滑移受到侧向约束，在轴向荷载作用下，试样的弹性变形占试样变形的主要部分，这与 S. F. Guo 和 S. W. Qi<sup>[25]</sup>得到的结论一致，即高围压弱化了试样的不均匀性。因此，试样的弹性模量不再因围压限制裂隙

滑移的作用而增大，而是饱水试样弹性特性的真实反映。

采用动点回归方法(见图 10)对轴向应力-应变曲线峰前段进行分析，即利用“移动测窗”扫掠曲线，对测窗包含的局部曲线性质进行分析。对于轴向应力-轴向应变曲线，对测窗中的曲线线性拟合，得到每小段的“平均变形模量”。通过敏感性分析，E. Eberhardt<sup>[26]</sup>指出，测窗中包含分析数据总数的 5%是最恰当的。对于不同围压下的轴向应力-轴向应变曲线峰前段，取  $\Delta\sigma = 0.05\sigma_{max}$ ，得到不同加载状态下的变形模量。应当注意的是，该方法得到的局部变形模量较通常弹性模量的求取方法更加局部化与精细化，并不等同于不同加载阶段的弹性模量。因为弹性模量是在曲线近似直线段部分求得的，也就是试样处于弹性阶段的变形性质。而对于峰前曲线的第 和 第 阶段存在明显存在的非线性特征，分阶段的“局部变形模量”反映的是试样峰前阶段的变形特征。对天然和饱水试样不同围压下的轴向应力-轴向应变曲线进行分析，得到不同加载阶段的变形模量变化规律见图 11。可以看出无论是对天然还是饱水状态的试样，低围压时临近峰前变形模

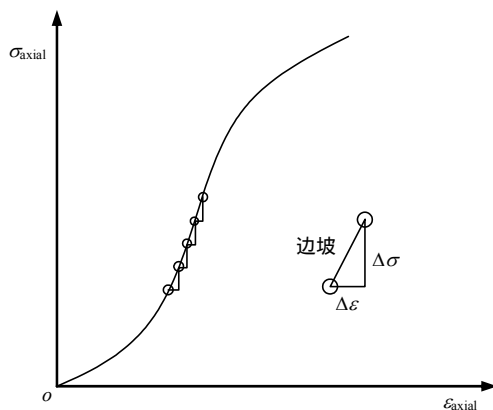


图 10 动点回归方法示意图

Fig.10 Illustration of the moving point regression technique

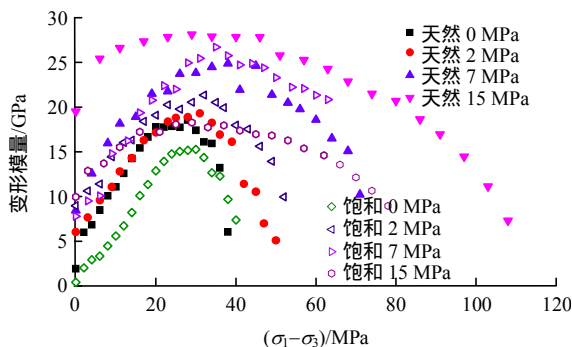


图 11 不同加载阶段下变形模量演化规律

Fig.11 Deformation modulus evolution under different loading states

量下降明显，随围压增大，峰前变形模量降低更加平稳缓和。而围压同样为 7 和 15 MPa 时，饱水试样临近峰值时变形模量降低幅度略小于天然试样。因此，高围压和试样饱水这 2 个因素，可以使试样的变形趋于均匀。

### 3.5.3 强度的离散性

碎屑岩石力学性质与碎屑岩的成分和结构密切相关<sup>[1]</sup>。由表 3 可以看出，8 组试样中有半数的变异系数超过 10%，表明 B 类角砾岩的单轴和三轴抗压强度离散性较大。根据 X 射线衍射分析结果，试样中白色矿物为方解石，黄色部分主要成分是白云石和石英，见图 12 所示。从 X 射线衍射试验磨岩粉过程中明显可以感到黄色岩块较方解石更易破碎，显然，方解石的强度高于由白云石和石英组成的岩块。

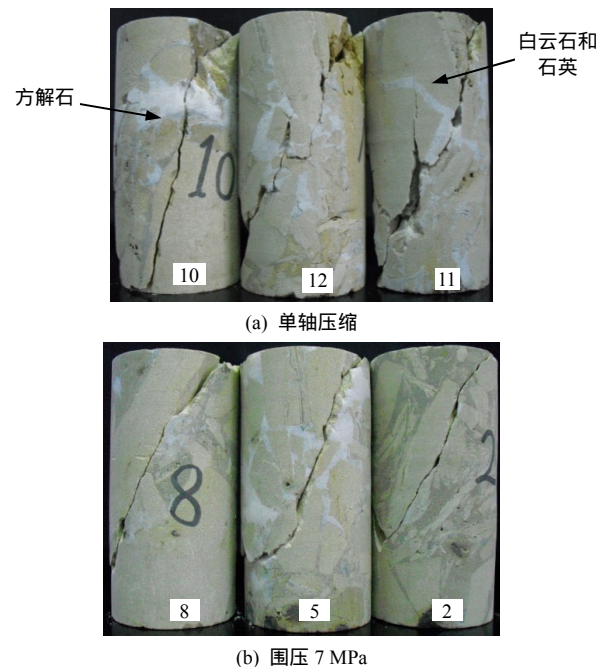


图 12 单轴压缩和 7 MPa 围压下饱水状态试样破坏形态

Fig.12 Failure modes of saturated specimens in uniaxial compression test and compression test with 7 MPa confine pressure

从饱水状态的单轴压缩结果来看，10 号和 12 号试样的强度超过 40 MPa，甚至大于天然状态的单轴压缩强度，11 号试样强度仅 33.9 MPa；饱水状态围压 7 MPa 时，2 号试样强度 48.2 MPa，明显低于 5 号试样(74.9 MPa)和 8 号试样的强度(68.3 MPa)。从破坏后的试样外观看，可以发现强度较低与强度较高试样中，方解石的含量有明显的差异。围压 7 MPa 时，5 号试样强度最高，其所含方解石含量也最高；8 号试样强度次之，其所含方解石含量也低

于 5 号试样；而强度最低的 2 号试样，几乎不含方解石，整个试样由白云石组成。单轴压缩强度较高的 10 和 12 号试样中方解石含量也明显高于强度较低的 11 号试样。

因此，造成试样强度离散性大的主要原因是方解石含量所占比重的不同。饱水状态下单轴压缩和 7MPa 围压下试样的破坏形态见图 12。同样，由于试样矿物的不均一，且试样破坏断面不同，破坏时的轴向应力不同，相同围压下，残余强度的离散性也较大。

### 3.5.4 强度参数作用机制

饱水状态试样的峰值强度、残余强度、内摩擦角和残余内摩擦角均低于天然状态试样，体现出水对角砾岩强度和内摩擦因数的弱化作用。其中饱水状态下内摩擦角的降低可以从有围压时试样的破裂面与轴向的夹角直观地看出，饱水状态试样的宏观破裂面的法向与轴向的夹角略小于天然状态，见图 13。饱水状态较天然状态下内摩擦角的增大和黏聚力的减小，体现出作为岩石强度参数内摩擦和黏聚力的不同作用机制。J. C. Jaeger 等<sup>[27-29]</sup>认为，岩石属于双强度材料，在加载条件下，黏聚力最先发挥作用，随轴向荷载增大，试样内部最弱断面最先发生剪切屈服，内摩擦力随塑性应变的增大而逐步增大。饱水状态下，试样受水的浸润，相比于天然状态的角砾岩，黏结强度增大，表现为黏聚力的增大，反映了水对角砾岩黏结强度的提高作用；而内摩擦角减小，体现出水对内摩擦因数的弱化作用。

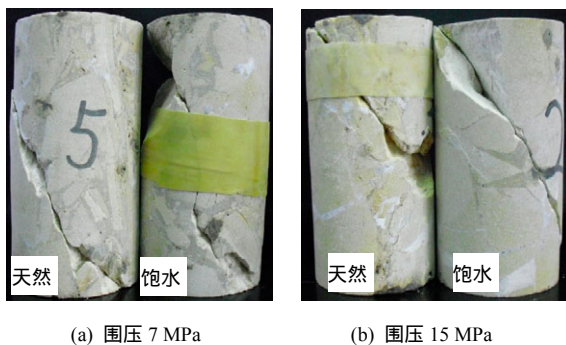


图 13 不同围压下天然状态和饱水状态试样破坏面与轴向夹角对比

Fig.13 The angles between specimen axes and failure planes for natural and saturated specimens under different confining pressures

残余强度是试样破坏之后由摩擦力所维持的承载能力<sup>[22]</sup>。天然和饱水状态下 B 类角砾岩的残余强度随围压增大基本线性增大，表明峰后阶段，摩擦

力与正应力呈线性关系，摩擦因数基本不变，围压是试样峰后承载能力的敏感因素。同样，由于试样矿物的不均一，且试样破坏断面不同，破坏时的轴向应力不同，相同围压下，残余强度的离散性较大。从不同状态的残余强度参数来看，饱水状态下残余内摩擦角和残余黏聚力均略微低于天然状态下的残余内摩擦角和残余黏聚力，表明对峰后试样的力学性质，水的软化效应不明显。从内摩擦角和黏聚力从初始值到残余值的变化来看，天然状态下，残余内摩擦角较初始内摩擦角并没有明显的减小，说明峰后试样产生宏观破裂面后，破断面的咬合作用产生的摩擦力，在侧向围压约束下，仍能发挥较大的承载能力；残余黏聚力较初始黏聚力，降低 65.69%，黏聚力在峰后降低明显；饱水状态下，残余内摩擦角较初始内摩擦角有所增大，而残余黏聚力较初始黏聚力降低 78.01%，表明水饱和的试样在峰后阶段，承载力主要由摩擦力提供，而试样的黏结强度大幅降低。

### 3.5.5 破坏特征

对于试样单轴压缩破坏形式，尤明庆<sup>[21]</sup>给予充分研究并最终归纳为 5 种破坏形式，并指出沿单一断面的剪切滑移破坏是少见的。饱水状态试样单轴压缩时，试样并非常见的拉伸破坏，而是均为沿单一斜面的剪切破坏(见图 12(a))，且剪切面附近发育有近似平行于最大主应力方向的拉裂纹。破坏面附近的拉裂纹说明剪切滑移会产生张拉应力，试样沿轴线的张拉作用机制见图 14<sup>[21]</sup>。从试样中取出包含剪切面 AB 的“隔离体”，剪切滑移面上有正压力  $N$  和摩擦力  $F$ ，由这 2 个力产生垂直于轴向的拉力  $N\cos\alpha - F\sin\alpha$ 。虽然剪切面附近产生张拉应力，但试样并非通常情况下的拉伸破坏，而最终仍由剪切控制形成宏观破坏面，说明饱水试样抗拉强度较天然状态有所提高。从其力学参数(初始量)较天然状态的变化来看，黏聚力增大而内摩擦角减小，因此认为饱水状态试样黏聚力的增大导致抗拉强度提高；天然状态试样单轴压缩时，试样表面出现多条近似平行于最大主应力的张拉裂纹，且多组张拉裂纹贯通后，在试样表面切割出小岩块从试样表面脱离，脱离的小岩块多呈三棱锥体或三棱柱体，剥离后的试样表面粗糙，表现为明显的压致张拉劈裂破坏，天然状态试样单轴压缩破坏形态见图 15。由于试验机压头存在摩擦效应，试样的上下端部没有产生张拉破坏<sup>[21]</sup>。有围压时，试样均沿倾斜面剪切破



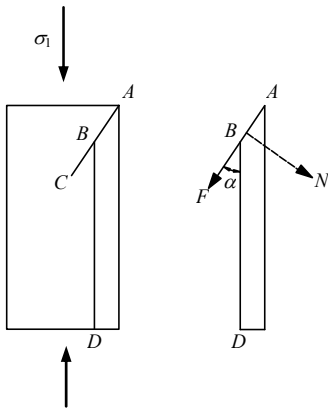


图 14 单轴压缩试样沿轴向拉伸作用机制<sup>[21]</sup>

Fig.14 Mechanism of tension along specimen axis under uniaxial compression<sup>[21]</sup>



图 15 天然状态试样单轴压缩破坏形态

Fig.15 Failure modes of specimens in natural state under uniaxial compression

坏,低围压下破坏面粗糙,呈凹凸起伏状,不平整;随围压增大,破坏面表面趋于平整。这是因为低围压下,试样中局部软弱部位的强度对试样强度起控制作用,试样沿此薄弱带破坏;而在相对较高围压下,薄弱带在较高的静水压力下被压实,其承载能力有所提高,且较大的侧向约束限制沿软弱面的剪切滑移,此时轴压需加载至较高水平才能导致试样破坏,而角砾岩本身强度并不高,此时薄弱带不再是强度的控制断面,试样沿完整岩石破坏。不同围压下典型试样的破坏面形态见图 16。

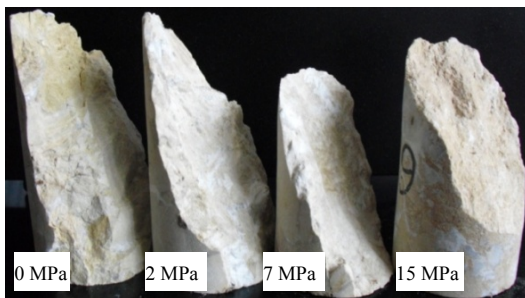


图 16 饱水状态试样不同围压下典型试样破坏面形态

Fig.16 Typical failure modes of specimens in saturated state under different confining pressures

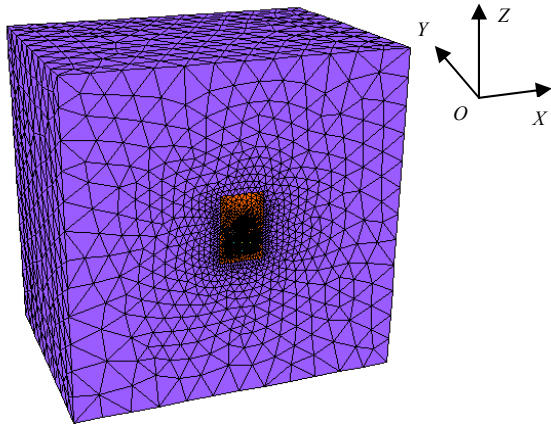
## 4 开挖卸荷下角砾岩区域围岩稳定性分析

### 4.1 几何网格模型与数值计算参数

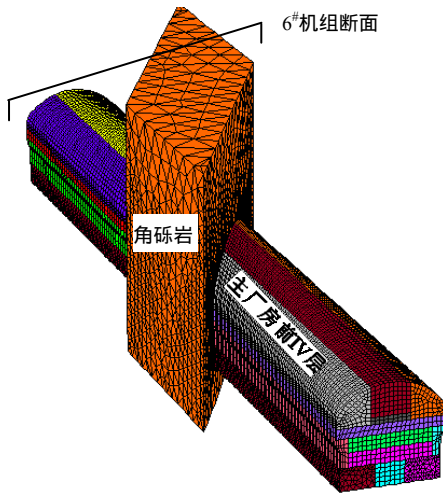
根据主厂房第 I 层开挖揭露的角砾岩空间分布形态,建立主厂房含角砾岩区域的三维数值计算模型。根据现场监测和同类工程经验,主厂房开挖至第 IV 层(岩锚梁底高程至母线洞顶高程)以后,开挖对顶拱的影响可以忽略,因此主厂房模型仅包含开挖分层前 4 层。模型以主厂房第 I 层底板中部为中心。计算模型几何边界从原点,上下左右各延伸 200 m,使模型边界到洞室的距离超过 3 倍最大洞室尺寸<sup>[30]</sup>,以消除边界效应的影响。角砾岩沿洞轴线最长出露 56 m,模型沿洞轴线(y 方向)取 286 m,角砾岩区域前后延伸 100 m,使得重点关注的角砾岩处于模型中间部位。模型划分 457 546 个单元,数值计算网格模型见图 17。鉴于由角砾岩的室内单轴、三轴试验得到峰值强度与围压具有较好的线性关系,且峰后具有应变软化的性质,数值计算中角砾岩的本构模型选取应变软化的莫尔-库仑(Strain-Softening Mohr-Coulomb Model)准则,灰岩的本构模型选取 M-C 准则。计算所用力学参数见表 4, E 表示弹性模量, c<sub>0</sub> 和 φ<sub>0</sub> 分别表示初始黏聚力和初始内摩擦角, c<sub>r</sub> 和 φ<sub>r</sub> 分别为残余黏聚力和残余内摩擦角, σ<sub>t</sub> 为抗拉强度, ε<sub>c</sub><sup>p</sup> 为黏聚力弱化到残余值时的应变阈值, ε<sub>φ</sub><sup>p</sup> 为内摩擦阻力对提高承载能力全部发挥时的应变阈值。三轴压缩数值试验与室内试验结果较吻合,不同围压数值计算与室内试验的轴向应力-应变曲线见图 18。该厂址区以自重应力为主,数值计算中施加自重应力和侧向压力,侧压系数由地应力实测值反演而来。数值模拟中角砾岩区的支护措施和参数按照设计通知进行模拟,张拉锚杆 φ32 mm,杆长 9 m,间排距 1 m×1 m;1 500 kN 级内锚类锚索长 46 m,间排距 3 m×3 m,锚杆和锚索交错布置,均用 FLAC<sup>3D</sup> 内置结构单元 cable 单元模拟。第 IV 层开挖后锚杆和锚索支护示意图见图 19。

### 4.2 计算结果及现场监测数据的验证

采用上述本构模型与参数模拟主厂房角砾岩区域分层开挖和支护。中导洞开挖后的拱顶声波孔位置见图 20(a),实测松动圈深度 3.0 m。计算得到中导洞开挖后 1+246 断面塑性区如图 20(b)所示,松弛深度 2.9 m,与实测值相差 0.1 m,吻合较好。



(a) 数值网格模型



(b) 角砾岩与厂房的位置关系

图 17 左岸主厂房包含角砾岩区域的三维数值计算网格模型

Fig.17 Three-dimensional numerical model of main power house including breccia body in left bank

表 4 数值计算中的力学参数

Table 4 Mechanical parameters in numerical computation

岩性	状态	$E/GPa$	$c_0/MPa$	$c_r/MPa$	$\Phi_0/(^\circ)$	$\Phi_r/(^\circ)$	$\sigma_t/MPa$	$\varepsilon_c^p$	$\varepsilon_\phi^p$
角砾岩	天然	11	9.0	3.0	35	33	1.2	$2.5 \times 10^{-3}$	$3.5 \times 10^{-3}$
	饱水	10	12.0	3.0	28	32	1.0	$10^{-3}$	$10^{-3}$
灰岩		30	15.0		40		2.0		

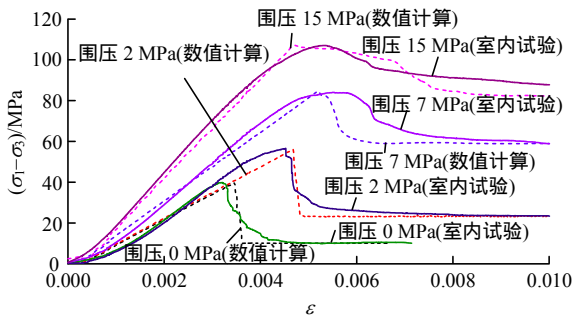


图 18 不同围压试验曲线与数值计算结果对比

Fig.18 Comparison between numerical and experimental results under different confining pressures

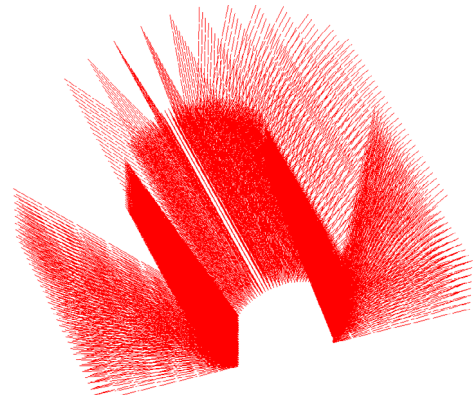
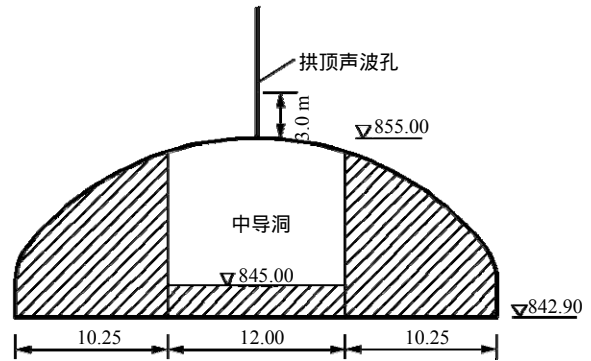
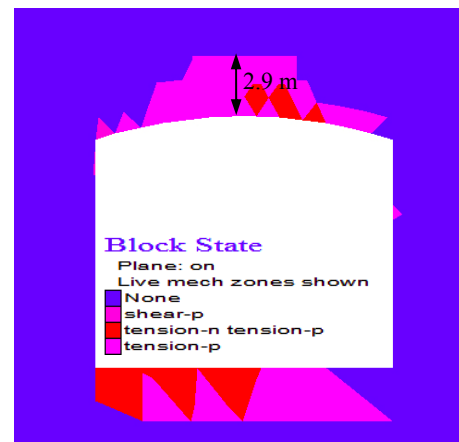


图 19 角砾岩区域锚杆和锚索支护示意图

Fig.19 Schematic view of anchor bolts supporting in surrounding rock of B-type breccia area



(a) 1+246 拱顶声波测孔示意图(单位: m)



(b) 1+246 断面塑性区

图 20 1+246 拱顶计算塑性区的验证

Fig.20 Verification of numerical plastic zones at vault in 1+246 profile

主厂房 6#机组剖面(角砾岩区域)拱顶处围岩位移随开挖层数变化曲线见图 21。主厂房开挖至第 IV 层时,开挖对顶拱角砾岩区域的围岩变形几乎不再产生影响,顶拱角砾岩达到稳定状态。从现场多点位移计的监测成果看,第 IV 层开挖结束后,顶拱角砾岩区围岩变形收敛。计算得到天然状态下的 6#机组剖面的位移等值线图与最大主应力等值线图见图 22。

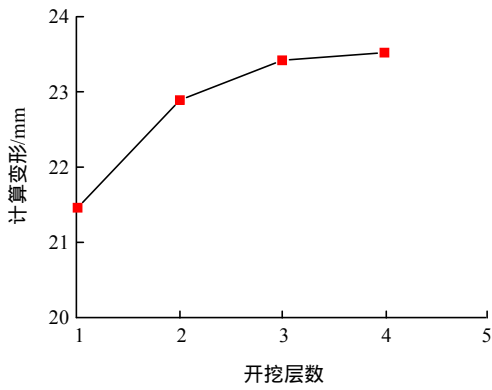
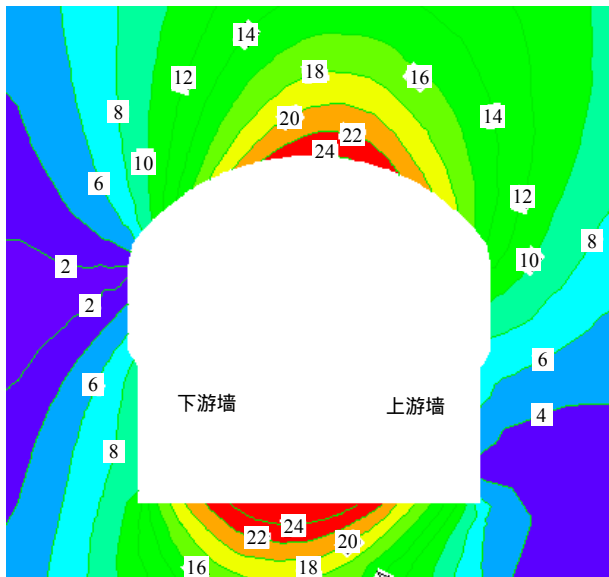
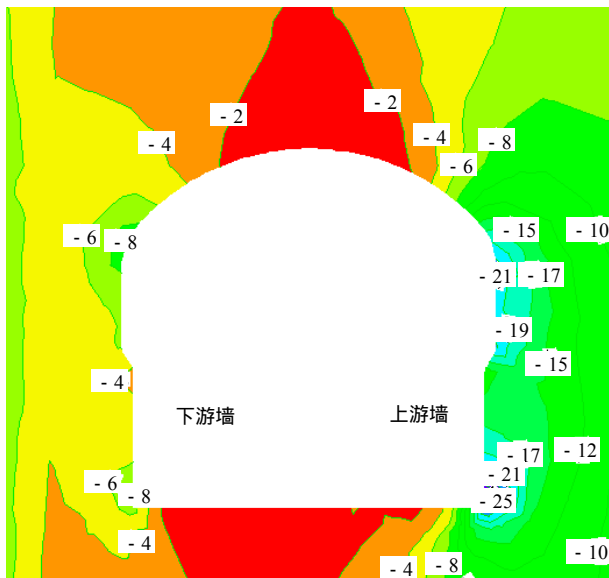


图 21 逐层开挖 6#机组拱顶角砾岩计算变形

Fig.21 Calculated displacement of B-type breccia at vault in #6 generator set profile during excavation layer by layer



(a) 位移等值线图(单位: mm)



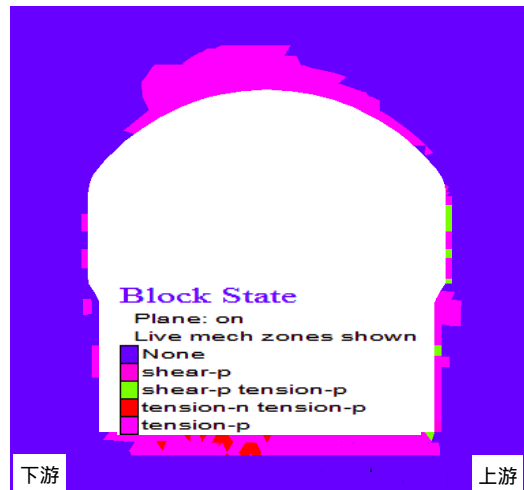
(b) 最大主应力等值线图(单位: MPa)

图 22 6#机组剖面计算结果等值线图

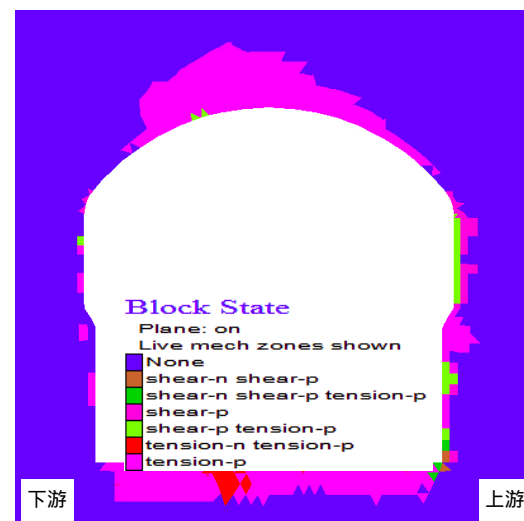
Fig.22 Contours of numerical computing results of #6 generator set profile

该场址区以自重应力为主,主厂房第 IV 层开挖完毕后,顶拱围岩变形最大。受初始地应力方向和角砾岩空间分布的影响,6#机组剖面围岩最大变形偏向拱顶上游侧。从最大主应力看,上游拱肩和上游底脚处易产生应力集中,上游拱肩和上游拱脚处应力集中的量值分别达到 21 和 25 MPa,现场施工应重点关注上游拱肩围岩稳定性,经过对围岩局部补强加固,该处围岩稳定性良好。

6#机组剖面角砾岩区在天然状态和饱水状态下的塑性区分布如图 23 所示。从破坏模式看,顶拱和下游边墙处多为拉破坏,上游边墙表面会出现拉破坏和拉剪破坏。从塑性区分布来看,上游边墙较下游边墙破坏严重;饱水状态下,顶拱、上游边墙和底板塑性区深度增大。表明饱水状态下围岩潜在的破坏范围增大,现场应尽量避免围岩浸水,水的



(a) 天然状态塑性区示意图



(b) 饱水状态塑性区示意图

图 23 天然与饱水状态 6#机组剖面塑性区示意图

Fig.23 Plastic zones under natural and saturated state in #6 generator set profile

利影响会恶化角砾岩的局部稳定性。

由于顶拱的多点位移计是在主厂房第 I 层开挖完成后埋设的，第 I 层开挖导致的围岩绝对变形量未能监测到，现有的监测成果是后续开挖围岩的变形增量。截至第 IV 层开挖完毕，实测位移增量与计算得到的位移增量见表 5。

表 5 典型断面围岩位移增量计算值与实测值<sup>[31]</sup>对比

Table 5 Comparison of calculation and measured<sup>[31]</sup> surrounding rock displacement increment in typical section

测量位置	实测值/mm	计算值/mm
1+266.00 顶拱	1.26	1.53
1+289.00 上游墙	6.26	4.68
1+238.85 下游墙	2.89	3.02

由表 5 可以看出，计算值与实测值吻合较好，数值计算结果得到验证。由现场位移监测数据看出，围岩变形已收敛，在现有支护条件下，稳定性良好。

## 5 结 论

本文通过现场勘查、现场声波测试和刚性承压板试验以及天然状态和饱水状态试样的室内试验，对某水电站地下主厂房第 I 层开挖揭露出的 B 类角砾岩进行了详细的调查和试验，得到了其基本物理力学参数，并通过数值计算和现场位移监测对角砾岩洞段的顶拱稳定性进行了分析，得到以下结论：

(1) 现场勘查表明，B 类角砾岩属粗粒结构，角砾粗大；角砾成分为灰岩或大理岩化白云岩，多呈碎石或块石状，角砾含量较多，一般在 60% 以上。角砾岩与母岩胶结紧密，似熔融胶结。

(2) 室内单轴和常规三轴压缩试验结果表明，B 类角砾岩属典型的弹脆塑性体，饱水状态下由于微裂隙的闭合，加载过程中初始压密阶段不明显。由动点回归方法求得试样在峰前阶段的变形模量的变化规律，得到高围压和试样饱水这 2 个因素，可以使试样的变形趋于均匀。

(3) 峰值强度的离散性是由试样中不同矿物含量不同导致的，方解石含量越高，试样峰值强度越大。同样，由于试样矿物的不均一，且试样破坏断面不同，破坏时的轴向应力不同，相同围压下，残余强度的离散性也较大。

(4) 饱水试样较天然状态试样，内摩擦角减小而黏聚力增大，一方面表现出内摩擦角和黏聚力做为强度参数，其承载作用机制不同，另一方面体现水对角砾岩内摩擦因数的弱化和黏结强度的强化作用。

(5) 从破坏特征看，天然状态试样单轴压缩下均为压致拉裂的拉伸破坏，而饱水试样单轴压缩均为沿单一斜面的剪切破坏，因此饱水试样由于黏聚力增大抗拉强度有所提高。

(6) 数值计算表明 6<sup>#</sup>机组断面角砾岩区在饱水状态下塑性区范围大于天然状态，水的不利影响恶化了角砾岩区的局部稳定性，因此施工现场应尽量避免围岩浸水。数值计算位移与现场实测位移吻合较好，围岩变形较小，表明在设计支护条件下 B 类角砾岩作为厂房顶拱是稳定的。

**致谢** 本论文成果得到中国长江三峡集团公司的资助，在此表示感谢。

## 参考文献(References)：

- [1] 孟召平, 苏永华. 沉积岩体力学理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006 : 22.(MENG Zhaoping, SU Yonghua. Theories and methods of lithesome mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2006 : 22.(in Chinese))
- [2] 赵温霞. 周口店地质及野外地质工作方法与高新技术应用[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2003 : 75.(ZHAO Wenxia. Methods and high-tech application of field geology work and Zhou Koudian geology[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2003 : 75.(in Chinese))
- [3] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988 : 20.(SUN Guangzhong. Mechanics of rock mass structure[M]. Beijing, 1988 : 20.(in Chinese))
- [4] 贺明武, 彭吉银, 王义峰, 等. 乌东德水电站左岸地下厂房区角砾岩地质力学特性及其工程防治实践[J]. 岩土力学, 2014, 35(4) : 1 063 - 1 068.(HE Mingwu, PENG Jiyin, WANG Yifeng, et al. Geomechanical properties and engineering prevention of breccias in left bank underground powerhouse of Wudongde hydropower station[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4) : 1 063 - 1 068.(in Chinese))
- [5] 史明魁, 苟月明, 陈富文, 等. 火成角砾岩研究的意义与方法[J]. 华南地质与矿产, 2000, (2) : 29 - 33.(SHI Mingkui, GOU Yueming, CHEN Wenfu, et al. Significances and methods of study of eruptive breccias[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2000, (2) : 29 - 33.(in Chinese))
- [6] 邓建华, 黄醒春, 彭结兵, 等. 膏溶角砾岩不同天然含水率情况下力学特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(8) : 1 203 - 1 207.(DENG Jianhua, HUANG Xingchun, PENG Jiebing, et al. Mechanical properties of Gypsum Breccia with different water contents[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(8) : 1 203 - 1 207.(in Chinese))
- [7] 宋 飞, 赵法锁, 李亚兰. 石膏角砾岩蠕变特性试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(3) : 94 - 96.(SONG Fei, ZHAO Fasuo, LI Yalan. Experimental study of gypsum breccias creep characteristic[J]. Chinese Journal of Hydrogeology Engineering, 2005, 32(3) : 94 - 96.(in Chinese))
- [8] 熊江陵, 李建华. 太行山隧道膏溶角砾岩工程特性试验研究[J]. 铁道标准设计, 2007, 21(增1) : 6 - 8.(XIONG Jiangling, LI Jianhua. Experimental study of gypsum breccias engineering characteristic of

- the tunnel in Taihang Mountain[J]. Railway Standard Design, 2007, 21(Supp.1) : 6–8.(in Chinese)
- [9] 钮新强, 石伯勋, 翁永红, 等. 金沙江乌东德水电站可行性研究报告[R]. 武汉: 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 2011.(NIU Xinqiang, SHI Boxun, WENG Yonghong, et al. Feasibility study report of Wudongde hydropower station in Jinshangjiang River[J]. Wuhan : Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Reaserch, 2011.(in Chinese))
- [10] 长江勘测规划设计研究有限责任公司. 金沙江乌东德水电站施工地质简报[R]. 武汉: 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 2012.(Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Reaserch Limited Cooperation. Construction geology report of Wudongde Hydropower station in Jinshajiang river[R]. Wuhan : Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Reaserch Limited Cooperation, 2012.(in Chinese))
- [11] 朱勤文. 岩类学简明教程[M]. 武汉: 中国地质大学岩石教研室, 1989 : 35.(ZHU Qinwen. Brief tutorial of petrography[M]. Wuhan : China University of Geosciences Teaching-Research Office of Rock, 1989 : 35.(in Chinese))
- [12] 徐干成, 郑颖人, 乔春生, 等. 地下工程支护结构与设计[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013 : 55.(XU Gancheng, ZHENG Yingren, QIAO Chunsheng, et al. Supporting Structure and Design in Underground Engineering[M]. Beijing : China Water Power Press, 2013 : 55.(in Chinese))
- [13] 冯夏庭, 张传庆, 李邵军, 等. 深埋硬岩隧洞动态设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2013 : 140.(FENG Xiating, ZHANG Chuanqing, LI Shaojun, et al. Dynamic design method for deep tunnels in hard rock[M]. Beijing : Science Press, 2013 : 140.(in Chinese))
- [14] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T50226—2013 工程岩体试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB/T50226—2013 Standard for test method of engineering rock mass[S]. Beijing : China Planning press, 2013.(in Chinese))
- [15] 中华人民共和国行业标准编写组. SL264—2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. SL264—2001 Specifications for rock tests in water conservancy and hydroelectric engineering[S]. Beijing : China Standard Press, 2001.(in Chinese))
- [16] 陈静. 硬岩时效变形和破坏机制及其工程行为分析[博士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2013.(CHEN Jing. Time-dependent deformation and fracture mechanism of hard rock and engineering behavior analysis[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan : Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013.(in Chinese))
- [17] STILLE H, PALMSTRÖM A. Ground behavior and rock mass composition in underground excavations[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(1) : 46–64.
- [18] 张凯, 周辉, 冯夏庭, 等. 大理岩弹塑性耦合特性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8) : 2 425–2 434.(ZHANG Kai, ZHOU Hui, FENG Xiating, et al. Experimental research on elastoplastic coupling character of marble[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8) : 2 425–2 434.(in Chinese))
- [19] HUDSON J A, HARRISON J P. 工程岩石力学, 上卷: 原理导论[M]. 冯夏庭译. 北京: 科学出版社, 2009 : 65.(HUDSON J A, HARRISON J P. Engineering rock mechanics, an introduction to the principles[M]. Beijing : Science Press, 2009 : 65.(in Chinese))
- [20] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2012 : 97.(CAI Meifeng. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing : Science Press, 2012 : 97.(in Chinese))
- [21] 尤明庆. 岩石的力学性质[M]. 北京: 地质出版社, 2007 : 17.(YOU Mingqing, Mechanics properties of rock[M]. Beijing, Geology Publishing House, 2012 : 17.(in Chinese))
- [22] 周辉, 孟凡震, 张传庆, 等. 基于应力-应变曲线的岩石脆性特征定量评价方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6) : 1 114–1 122.(ZHOU Hui, MENG Fanzhen, ZHANG Chuanqing, et al. Quantitative evaluation of rock brittleness based on stress-strain curve[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(6) : 1 114–1 122.(in Chinese))
- [23] 郭应征, 李兆霞. 应用力学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000 : 2.(GUO Yingzheng, LI Zhaoxia. Foundation of applied mechanics[M]. Beijing : Higher Education Press, 2000 : 2.(in Chinese))
- [24] 中华人民共和国国家标准编写组. GB 50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB 50021—2001 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. Beijing : China Building Industry Press, 2009.(in Chinese))
- [25] GUO S F, QI S W. Numerical study on progressive failure of hard rock samples with an unfilled undulate joint[J]. Engineering Geology, 2015, 193 : 173–182.
- [26] EBERTHARDT E. Brittle rock fracture and progressive damage in uniaxial compression[Ph. D. Thesis][D]. Saskatoon : University of Saskatchewan, 1998.
- [27] JAEGER J C. Rock failure at lower confining pressure[J]. Engineering, 1960, 189 : 283–284.
- [28] 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, 29(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, 29(1) : 144–152.(in Chinese))
- [29] 郑颖人, 孔亮. 岩土塑性力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010 : 10.(ZHENG Yingren, KONG Liang. Geotechnical plasticity mechanics[M]. Beijing : China Building Industry Press, 2010 : 10.(in Chinese))
- [30] 江权, 冯夏庭, 向天兵, 等. 大型洞室群稳定性分析与智能动态优化设计的数值仿真研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(3) : 524–539.(JIANG Quan, FENG Xiating, XIANG Tianbing, et al. Numerical simulation method for stability analysis and intelligent and dynamic of optimization design of large cavern group[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(3) : 524–539.(in Chinese))
- [31] 乌东德工程建设部技术管理部. 乌东德水电站安全监测周报(地厂工程)[R]. 北京: 中国长江三峡集团公司, 2015.(Ministry and technical management department of Wudongde engineering. Weekly report of safety monitoring for Wudongde hydropower station (underground main powerhouse engineering)[R]. Beijing : China Three Gorges Corporation, 2015.(in Chinese))