

文章编号: 1000 - 7598 (2014) 04 - 1063 - 06

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

贺明武¹, 彭吉银¹, 王义峰¹, 周扬一², 江 权², 徐鼎平²

(1. 中国长江三峡集团公司, 北京 100038; 2. 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, 武汉 430071)

摘 要: 针对乌东德水电站左岸地下厂房区的角砾岩这一不良地质体的地质力学与稳定性问题, 首先采用系统的工程现场调查、孔内电视观察和室内力学试验, 揭示了角砾岩基本的物理力学特征以及特殊的方解石胶结方式、似熔融的接触特征和强度特征; 进而通过三维数值模拟评估了开挖卸荷后主厂房顶拱角砾岩的基本力学特征, 阐明其围岩支护设计的基本要求; 左岸主厂房角砾岩实际开挖与支护实践的经验总结分析表明, 洞室顶拱稳定性良好。从上述多角度研究表明, 由于该类角砾岩经历成岩作用, 具有较好的自稳性和承载能力, 经合理加强支护后可以作为大型地下洞室顶拱的承载围岩, 其力学特性认识和工程防治经验可为同类不良地质体的工程处置借鉴。

关 键 词: 角砾岩; 力学特性; 地质条件; 工程防治; 松弛抑制

中图分类号: TU 223

文献标识码: A

Geomechanical properties and engineering prevention of breccia in left bank underground powerhouse of Wudongde hydropower station

HE Ming-wu¹, PENG Ji-yin¹, WANG Yi-feng¹, ZHOU Yang-yi², JIANG Quan², XU Ding-ping²

(1. China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The breccia, a typical unfavorable geologic body in Wudongde hydropower station with low strength, poses a potential threat to the stability of underground cavern in left bank. Firstly, physico-mechanical properties of breccia, as well as the strength, cementation with limestone, dolomite and marble, and fusing contact characteristics are obtained by in-situ investigation and borehole television, and experiments in laboratory. Following that a 3D numerical simulations, which consider the left hill and underground cavern and are suggested mechanical parameters, are performed to simulate the excavating of main powerhouse for revealing the mechanical responses of breccia in roof during excavation. The simulated result provides useful information for detail design of rock supporting by showing the calculated failure approach index. The responding supporting design including the prestressed rock bolt, shotcrete and prestressed anchor cable. In-situ practice involving rock excavation and reinforcement indicates that the breccia in the roof remains stable, which is also confirmed by in-situ monitoring deformation with convergence pattern. This analysis indicates that the breccia can be adopted as load bearing rock in view of the acceptable self-stability and compressive strength related to the diagenesis process. Detail excavating and supporting schemes which utilizes the relaxing-inhibition supporting idea are applicable and practical.

Key words: breccia; mechanical properties; geology condition; engineering prevention; relaxing inhibition

1 引 言

我国西部地区工程地质条件复杂, 地下洞室修建过程中常遇到不良地层或地质体以及由此引起的工程稳定性问题。各种软弱夹层、岩脉、破碎体等

是其中一类典型问题, 如锦屏一级电站地下厂房中的煌斑岩脉、大岗山电站地下厂房区的断层破碎带、白鹤滩电站工程区的错动带^[1-4]等。

乌东德是我国第 3 大水电站, 地下厂房开挖过程中发现左岸地下厂房顶拱存在较大规模的角砾

收稿日期: 2012-11-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51104108, 51379202); 广西防灾减灾与工程安全重点实验室开放课题(No. 2012ZDK02)。

第一作者简介: 贺明武, 男, 1983 年生, 学士, 工程师, 主要从事水工结构安全分析与工程管理方面的研究工作。Email: he_mingwu@ctgpc.com.cn

岩。由于该角砾岩的变形模量和岩体波速都小于周围岩体(灰岩)因而可能导致洞室顶拱围岩大变形、掉块、角砾岩-灰岩分离等稳定性问题。

为此,本文采用现场调查、钻孔电视、室内试验和三维数值模拟等多手段相结合的方法,深入论述了乌东德水电站左岸地下厂房顶拱出露的角砾岩的地质力学特性及其对地下厂房洞群稳定性的影响,并在此基础上探讨了加强支护措施,其试验研究认识对同类不良地质体的安全性评估具有较好的借鉴意义。

2 工程简介

乌东德水电站位于金沙江下游河段,总装机容量为 10 200 MW,以发电为主,兼顾防洪,建成后将是我国第 3 大水电站,其左右岸各布置 6 台机组。拟定左岸地下 3 大洞室(主厂房、主变洞和尾水调压室)并列平行布置。其中,主厂房顶拱跨度为 31.8 m,岩锚梁以下开挖跨度为 30.0 m,主厂房最大开挖尺寸为 333.0 m×32.5 m×89.9 m(长×宽×高);主变洞最大开挖尺寸为 255.6 m×18.5 m×34.2 m(长×宽×高);调压室采用下部独立,上部连通的长廊型布置方式,顶拱跨度为 32.0 m,最大开挖高度为 110.0 m(如图 1 所示)。

厂区地层主要由褶皱基底浅变质岩及盖层沉积岩构成,左岸褶皱基底分布在高程 1 000~1 200 m 以下,上部为不整合接触缓倾盖层。褶皱基底地层陡倾、岩层走向与河流走向大角度相交。主厂房位于峡谷岸坡内,外侧端墙距岸边距离约 90 m,上覆岩体厚,埋深为 250~550 m。主厂房所在土层为落雪组第 3 段地层,主要为互层状大理岩化白云岩及厚层灰岩、大理岩及巨厚~厚层白云岩,岩层走向为 270°~280°,岩层倾向为 S(即下游),倾角为 70°~80°,洞轴线与岩层走向夹角约为 30°~40°(洞室轴线方向为 NE60°),围岩以 I 类围岩为主,占 58.5%,次为 II 类围岩,占 41.5%^[4]。可见地下厂房围岩条件总体优良。

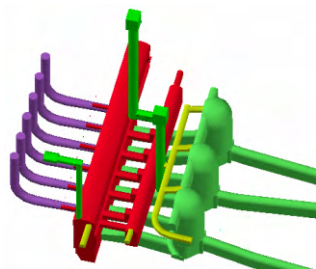


图 1 乌东德水电站左岸地下洞群三维布置图
Fig.1 3D layout of underground caverns of Wudongde hydropower station in left bank

然而,通过主厂房第 1 层开挖揭露发现厂房 5#~6#机组段存在较大规模且风化明显的角砾岩。该角砾岩为方解石胶结,成团块状,以不规则形态嵌于围岩内,总分布范围长约 80 m,高约 40~70 m,宽度为 40 m(见图 2)。由于该角砾岩与厂区灰岩和白云岩岩体在波速上存在较为明显的差别,可能导致主厂房顶不均匀下沉变形和掉块问题,故需要深入评价该出露角砾岩的地质力学特性并考虑采取合理的加强支护措施以确保地下洞室的整体稳定。

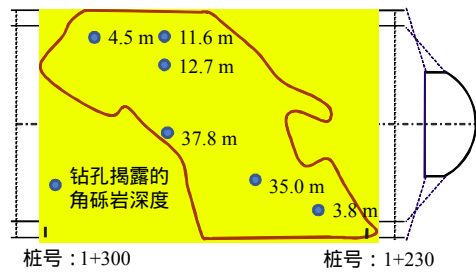


图 2 主厂房第 1 层开挖后轮廓面上角砾岩展布图
Fig.2 Spatial distribution of breccia on the first layer of main powerhouse

3 角砾岩地质力学特性分析

该角砾岩是坝址区局部灰岩、白云岩、大理岩等岩体受构造或其他因素影响先破碎成角砾,后期在低温热液地质环境条件下又重新胶结形成的具有局部团块特征的一类特殊岩体,具有独特的工程地质特征和力学特性。

3.1 工程地质特征

角砾岩角砾成分为白云岩及灰岩,大小一般为 0.02~0.40 m,最大为 1.0~2.0 m,角砾含量一般约为 40%,局部含量较高;角砾主要呈弱~微风化状,局部风化色变呈灰黄色。内部结构面少见,一般呈整体结构(见图 3)。角砾间多为方解石胶结,局部为钙质胶结。胶结多紧密,局部见米粒大小的溶蚀空洞;局部方解石溶蚀风化亦呈灰黄色,偶见加剧风化色变成似强风化状。



图 3 厂房洞室开挖面揭露的角砾岩
Fig.3 Breccia in the opening face

进一步的钻孔内声波测试表明：角砾岩体声速一般为 3 800 ~ 4 800 m/s，平均值为 4 350 m/s，比围岩波速小约 100 m/s。这表明，角砾岩本身的致密程度与围岩之间存在一定差异。

3.2 钻孔电视观察

进一步的高清钻孔电视显示，角砾岩与周边围岩不存在明显的分界面或不连续裂隙，而呈现似熔融接触（见图 4）。这一观察结果与洞室开挖壁面出露的角砾岩分布特征相吻合，即角砾岩与周边岩体接触面弯曲，不规则，但与周边岩体胶结好，结合紧密，不存在不连续面。

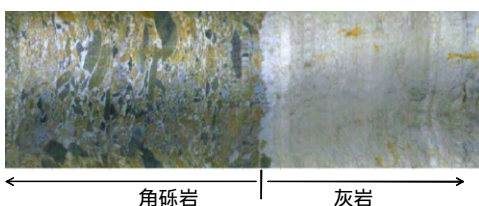


图 4 钻孔电视观测的角砾岩与灰岩接触面
Fig.4 Interface between breccia and the limestone observed by borehole television

3.3 室内试验分析

将现场所取角砾岩块制作成高度为 100 mm，直径为 50 mm 的标准岩芯后进行单轴压缩试验。饱和及干燥角砾岩的室内试验测试结果表明（见表 1）：

（1）饱和条件下，该角砾岩密度约 2.49 g/cm³、抗压强度约 41 MPa，泊松比约 0.3。

（2）干燥条件下，该角砾岩密度约 2.4 g/cm³、抗压强度约 56 MPa，泊松比约 0.28，软化系数约 0.73。

表 1 角砾岩基本物理力学特征

块体密度 / (g/cm ³)		岩石抗压强度 / MPa		软化系数	泊松比 μ	
天然	饱和	干燥	饱和		干燥	饱和
		82.1	45.0		0.27	0.30
2.40	2.49	47.9	41.6	0.73	0.29	0.30
		39.3	37.2		0.29	0.29

试验过程中发现，角砾岩的破裂面均沿胶结物劈裂破坏，而角砾本身破坏不明显（图 5），可见方解石胶结物本身强度要比角砾小得多。

通过角砾岩典型的应力-应变曲线分析可知，角砾岩破坏过程中，其扩容时对应的裂纹非稳定扩展点（B 点）的应力一般为其峰值强度（A 点）的 75%

左右（见图 6）。因此，参考陈宗基^[5]关于岩石长期强度判定方法，可认为该饱和条件下角砾岩的长期强度约为 31 MPa 左右，而干燥状态下角砾岩长期强度超过 40 MPa。



图 5 单轴压缩破坏的角砾岩裂纹特征
Fig.5 Cracks of breccia after uniaxial compressive test

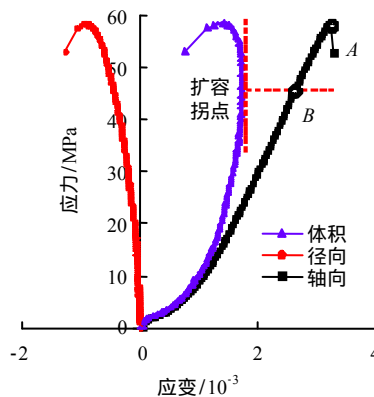


图 6 角砾岩单轴压缩时典型应力-应变曲线
Fig.6 Typical stress-strain curves of breccia under uniaxial compressive test in laboratory

基于现场调查和室内试验测试结果，根据文献 [6] 中洞室围岩详细分类的相关规定，该角砾岩围岩评分约为 60，属 II 类围岩，但为 III 类中偏弱的亚类。

4 角砾岩稳定性的数值分析

为了进一步评估地下厂房开挖过程中角砾岩的稳定性和可能带来的危害性，通过建立包含角砾岩和整个洞群的三维数值模型，分析洞室开挖过程中角砾岩的基本力学响应，从而为洞室顶拱围岩支护设计提供依据。数值计算模型沿 X 轴（正东向）和 Y 轴（正北向）的计算范围分别为 1 600、1 400 m，竖直方向从海拔 250 m 到山顶，模型中包含了地下洞室群的主体洞室，如主厂房、主变开关室、母线洞、尾闸室、尾水洞等，其数值网格单元约为 199×10⁴，节点约为 34×10⁴ 单元，见图 7。

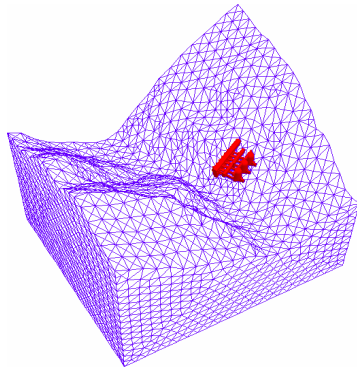


图 7 左岸洞群稳定性计算的三维网格模型
Fig.7 Meshed 3D numerical model for underground caverns in left bank

4.1 模型与参数

厂区陡倾层状大理岩和白云岩，其力学本构模型采用可同时反映岩体基质强度和岩体层面强度特征的遍布节理应变硬化/软化模型^[7]。该模型在岩体基质和层面（如图 8 所示）上均采用反映材料剪切破坏的摩尔-库仑（M-C）剪切屈服准则（ f^s 和 f_j^s ）及张拉破坏的最大拉应力强度准则（ f^t 和 f_j^t ）的复合屈服准则。具体表达式为

$$\left. \begin{aligned} f^s &= \sigma_1 - \sigma_3 + 2c\sqrt{N_\varphi} \\ f^t &= \sigma_3 - \sigma^t \\ N_\varphi &= \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} f_j^s &= \tau_s - c_j + \sigma_{33'} \tan \varphi_j \\ f_j^t &= \sigma_{33'} - \sigma_j^t \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中： c 和 φ 为基质的凝聚力与内摩擦角； c_j 和 φ_j 为层面的凝聚力与内摩擦角； σ^t 为基质的抗拉强度； σ_1 和 σ_3 分别为最小主应力和最大主应力（按计算力学定义，以实际值定义大小，拉应力为正，压应力为负；而非工程中的以压应力为正，拉应力为负）； $\sigma_{33'}$ 为层面的法向应力； τ_s 为层面上剪应力； σ_j^t 为层面的抗拉强度。模型的剪切和拉伸塑性势函数（ g^s 、 g^t ）为

$$\left. \begin{aligned} g^s &= \sigma_1 - \sigma_3 \sqrt{N_\psi} \\ g^t &= \sigma_3 \\ N_\psi &= \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} g_j^s &= \tau_s + \sigma_{33'} \tan \psi_j \\ g_j^t &= \sigma_{33'} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中： ψ 和 ψ_j 分别为基质和层面的剪胀角，当 ψ 和 ψ_j 采用与内摩擦角相同值时，为关联流动法则，采

用不同于内摩擦角值时为非关联流动法则。

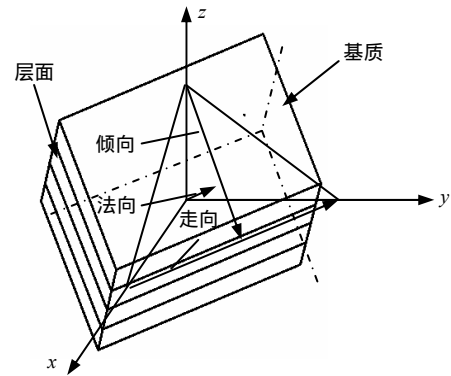


图 8 层状岩体模型的基质和层面示意图
Fig.8 Schematic figure of block and joint for stratified rock mass

而对于角砾岩，考虑其本身为钙质胶结体，无明显特定的优势层面或结构面，因此，数值模拟时将其等效为各向同性连续介质，采用基于摩尔-库仑屈服准则的理想弹塑性模型。

在前述的角砾岩现场调查、室内试验和原位试验^[8]分析基础上，综合相关规范建议，确定计算中的岩体力学参数取值如表 2 所示。

表 2 数值计算中的岩体物理力学参数取值表
Table 2 Physico-mechanical parameters of rock mass for numerical simulation

岩石类型	弹性模量 /GPa	泊松比	凝聚力 /MPa	内摩擦角 /($^\circ$)	抗拉强度 /MPa
角砾岩	7	0.30	0.6	35	0.3
大理岩	15	0.28	1.5	42	0.5

4.2 顶拱力学特征分析

采用上述模型和参数模拟洞室分层开挖与支护过程，分析洞室顶拱角砾岩力学特征可知：

(1) 洞室第 1 层开挖后围岩变形约为 25 ~ 30 mm，洞室下卧第 2 ~ 3 层开挖对顶拱角砾岩变形还存在一定影响，而第 4 层及以后各层开挖对角砾岩稳定性影响不明显，见图 9。

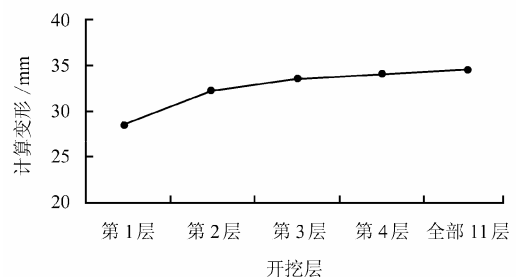


图 9 主厂房分层开挖过程中顶拱角砾岩变形特征
Fig.9 Calculated displacements of breccia in roof during excavation of the main powerhouse layer by layer

(2) 洞室开挖后，除了洞室高边墙部位围岩应力卸荷后松弛较为明显，顶拱角砾岩也存在较为明显的卸荷情况，表层角砾岩出现约 0.3 MPa 左右的拉应力，见图 10 (拉正压负)。因此，必要的表层喷混凝土和锚杆快速支护可有效改善围岩的应力状态，减小和抑制围岩开裂劣化。

(3) 进一步分析洞室开挖后围岩的塑性区深度可知，根据岩体破坏接近度指标 FAI [9]，施工期洞室开挖完成后的角砾岩塑性屈服区深度一般为 6~8 m ($FAI > 1.0$)；若考虑长期强度，据上述单轴压缩试验结果认为，其长期强度为峰值强度的 70%，则该岩体长期屈服区深度可能达到 15~20 m ($FAI > 0.7$)，见图 11。因此，从施工期安全角度看，系统锚杆支护深度应该超过其塑性区深度，而从确保工程长期安全角度考虑则可采取大吨位预应力长锚索加强支护，抑制围岩深层时效劣化。

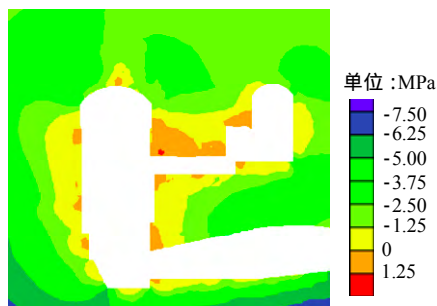


图 10 洞室开挖后围岩最小主应力分布云图特征
Fig.10 Nephogram of the minor principal stress of surrounding rock after complete excavation of caverns

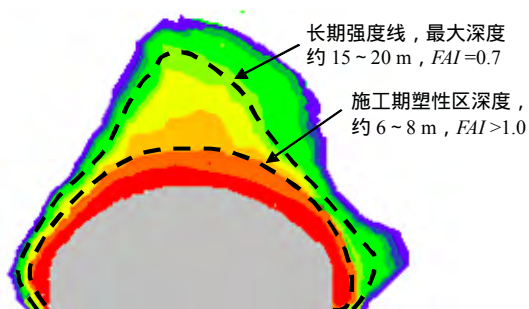


图 11 开挖完成后厂房洞室顶拱围岩屈服程度云图
Fig.11 Nephogram of failure index in the roof after complete excavation of main powerhouse

5 角砾岩支护实践

5.1 支护方式

洞室开挖过程中为了在顶拱围岩形成一个由表及里的完整承载圈 根据前述数值分析和现场调查，厂房角砾岩区采用的实际支护形式是：开挖后先快速以 5 mm 左右的喷混凝土封闭防止表层围岩松

弛，并以间距为 2 m×2 m、长 6 m 的 $\phi 32$ mm 中空注浆锚杆及时跟进支护，迅速抑制表层和内部浅层围岩的松弛劣化，然后进行间距为 2 m×2 m、长 9 m、预应力为 50 kN 的 $\phi 32$ mm 预应力锚杆支护及挂网喷射混凝土，以进一步增加表层支护，形成受力良好的表层柔性承载壳，并使围岩加强支护的深度超出施工期围岩塑性区深度，实现对浅-中层岩体的支护；最后采用 3 m×3 m 间距、长 33、36 m、1 500 kN 预应力锚索支护，大吨位预应力可一定程度恢复围岩的围压，抑制围岩深层劣化，从而确保厂房顶拱的长期稳定。该支护体系通过改善围岩受力状态 [10]，并抑制围岩的松弛和开裂，能够较好地保持围岩本身的强度和承载能力，从而体现了新奥法的基本思想：充分利用和发挥围岩的自承载能力，即松弛-抑制法。

同时，角砾岩洞段开挖过程中还进行了爆破参数优化，减小炮孔间距和装药量。经生产性试验总结出的角砾岩光面爆破参数为：周边光爆孔间距约为 45~50 cm，装药线密度为 90~100 g/m，单响药量控制在 20~25 kg 之间，并采用毫秒非电雷管分段延时起爆实现。

5.2 现场围岩支护效果

采用上述开挖支护方案，确保了左岸地下厂房顶拱开挖过程中开挖面的平整性，有效地避免了顶拱角砾岩掉块现象，初步实现了顶拱的稳定（见图 12）。



图 12 角砾岩顶初喷混凝土+预应力锚杆支护情形
Fig.12 Arch of powerhouse with supporting system of shorting concrete and prestressed anchors

开挖支护过程中同步的变形监测表明：洞室开挖后的总变形不大，最大实测变形约 20 mm 左右，且开挖后快速进入收敛阶段。而当顶拱围岩支护完成后，监测变形处于收敛状态，变形速率趋于 0 (洞内温度和测量误差导致监测变形具有小幅波动)，围岩松动圈测试表明，顶拱围岩松弛深度一般为 3 m 左右。

现场洞室开挖过程中多方面监测数据和现场调查显示,上述开挖支护措施能够有效地降低角砾岩区域顶拱变形量和掉块风险,初步表明了松弛-抑制法的科学性和合理性。

6 讨论与结论

(1) 本文通过系统的现场调查、孔内钻孔摄像,揭示了角砾岩特殊的方解石胶结方式、结合紧密的分界面特征、以及物理力学特征和强度特征。

(2) 采用地下洞室开挖的三维数值模拟分析,阐明了开挖卸荷后主厂房顶拱角砾岩的基本力学响应特征,提出采用喷层快速封闭、预应力锚杆浅层加固和锚索深层加固支护的基本方式。

(3) 由于该类角砾岩经历了成岩作用,自身胶结程度和完整性都较好,有别于一般散体堆积物的力学特性,具有较好的自稳性和承载能力,经合理加强支护后可以作为大型地下洞室顶拱的承载围岩体,这样显然可以通过利用围岩自身承载能力而达到适当减小加强支护量而获得经济效益。

致谢:感谢长江勘测设计院翁永红教授级高级工程师、王团乐教授级高级工程师、张存慧博士,水电葛洲坝乌东德项目部彭少引教授级高级工程师等为本研究提供的相关基础资料与宝贵建议。

参 考 文 献

- [1] 卢波,王继敏,丁秀丽,等. 锦屏一级水电站地下厂房围岩开裂变形机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(12): 2429 - 2441.
LU Bo, WANG Ji-ming, DING Xiu-li, et al. Study of deformation and cracking mechanism of surrounding rock of Jinping I underground powerhouse[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(12): 2429 - 2441.
- [2] 张学彬. 大岗山水电站厂房顶拱塌方处理研究与实践[J]. 四川水力发电, 2010, 29(6): 55 - 59.
ZHANG Xue-bin. Study of dealing method and practice

of arch collapse in Dagangshan hydraulic powerhouse[J]. **Sichuan Water Power**, 2010, 29(6): 55 - 59.

- [3] 江权,冯夏庭,周辉,等. 层间错动带的强度参数取值探讨[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3379 - 3386.
JIANG Quan, FENG Xia-ting, ZHOU Hui, et al. Discussion of strength value for interlayer shear belt[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(11): 3379 - 3386.
- [4] 钮新强,石伯勋,翁永红,等. 金沙江乌东德水电站引水发电建筑物工程招标设计报告[R]. 武汉: 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 2012.
- [5] 陈宗基. 地下巷道长期稳定性的力学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 1982, 1(1): 1 - 10.
CHEN Zong-ji. The mechanical problems for the long-term stability of underground galleries[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1982, 1(1): 1 - 10.
- [6] 水电水利规划设计总院. 水力发电工程地质勘察规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
- [7] Itasca Consulting Group, Inc.. Fast lagrangian analysis of continua in 3 dimensions (version 3.0), user's manual[M]. [S. l.]: Itasca Consulting Group, Inc., 2005.
- [8] 王团乐. 金沙江乌东德水电站施工地质简报[R]. 禄劝: 长江设计公司乌东德水电站设计代表处, 2013.
- [9] 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]. 岩土力学, 2007, 28(5): 888 - 894.
ZHANG Chuan-qing, ZHOU Hui, FENG Xia-ting. Stability assessment of rockmass engineering based on failure approach index[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(5): 888 - 894.
- [10] 何本国,朱永全,孙明磊,等. 高速铁路石膏角砾岩深埋隧道支护荷载确定方法[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 827 - 832.
HE Ben-guo, ZHU Yong-quan, SUN Ming-lei, et al. Method for determining supporting load of deep tunnel on high-speed railway in gypsum breccia stratum[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(3): 827 - 832.
- [11] of soft ground tunneling[C]//Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference. Chicago: [s. n.], 1972.
- [16] 黄钟晖,廖少明,刘国彬. 管片厚度对隧道受力及使用性能的影响[J]. 建筑技术, 2000, 31(7): 471 - 472.
HUANG Zhong-hui, LIAO Shao-ming, LIU Guo-bin. The effect of tunnel segment thickness on the behavior of tunnel in use[J]. **Architecture Technology**, 2000, 31(7): 471 - 472.

上接第 1062 页

- [13] 朱伟,钟小春,秦建设. 盾构隧道管片接头力学分析及双直线模型研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2155 - 2158.
ZHU Wei, ZHONG Xiao-chun, QIN Jian-she. Mechanical analysis of segment joint of shield tunnel and research on bilinear joint stiffness model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(12): 2155 - 2158.
- [14] PERSEN LEIF N. Rock dynamics and geophysical exploration[M]. Oxford: Elsevier Science Ltd., 1975.
- [15] PECK R B, HENDRON A J, MOHRAZ B. State of the art