

锦屏二级水电站深埋大理岩破裂扩展的时间效应

刘宁,张春生,吴旭敏,褚卫江

(中国水电顾问集团华东勘测设计研究院,浙江 杭州 310014)

摘要:针对在锦屏二级水电站引水隧洞中出现的大理岩滞后破裂现象,采用试验、监测、理论分析等手段综合分析了此现象的内在机理。锦屏二级引水隧洞的最大埋深2 525 m,应力和岩体强度之间的矛盾尖锐,埋深的变化导致属于脆性岩石的大理岩也出现了破裂扩展的现象。借助室内压缩试验确定破裂为大理岩的主要开挖响应方式,现场布置的锚杆应力计测量结果及声波测试结果都表明深埋大理岩存在破裂随时间扩展的特点;采用基于应力腐蚀理论开发的应力腐蚀模型PSC可以很好地模拟这一现象。

关键词:大理岩;破裂;时间效应;引水隧洞;锦屏二级水电站

中图分类号:TU452

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2013)02-0063-05

Time-dependent failure of deep-buried marble in Jinping II Hydropower Station//LIU Ning, ZHANG Chunsheng, WU Xumin, CHU Weijiang (*Hydrochina Huadong Engineering Corporation, Hangzhou 310014, China*)

Abstract: The deep-buried marble in the headrace tunnel of Jinping II Hydropower Station exhibit time-dependent failure. The internal mechanism of the phenomenon is comprehensively analyzed by means of tests, monitoring and theoretical analysis. The largest buried depth of the headrace tunnel reaches 2 525 m, and the contradiction between the stress and rock mass strength is sharp. The variation of buried depth makes the marble which belongs to brittle rock also exhibit the phenomenon of fracture extension with time. The fracture is regarded as the main excavation response based on the laboratory compression tests. The field anchor stress meters and acoustic wave tests show the time-dependent failure characteristics of deep-buried marble. The parallel-bonded stress corrosion model based on the stress corrosion theory can be employed to satisfactorily simulate such phenomenon.

Key words: marble; fracture; time-dependent failure; headrace tunnel; Jinping II Hydropower Station

锦屏二级水电站工程中的4条引水隧洞是迄今为止中国岩石工程建设中埋深最大的地下工程,一般埋深为1 500~2 000 m,最大埋深达到2 525 m,仅自重应力已相当可观,再加上构造作用,使锦屏引水隧洞表现出强烈的高地应力特点,实测最大主应力42.11 MPa,通过反演得到的最大主应力约为70 MPa。在如此高地应力条件下,大理岩所表现出的宏观力学特性与常规应力条件下相比具有明显不同的特点,由此也导致了锦屏二级水电站工程复杂的围岩响应,并出现了许多新的值得深入研究的问题。

锦屏二级水电站引水隧洞沿线围岩除部分板岩和绿泥石片岩外,整个引水隧洞围岩属于Ⅱ类和Ⅲ类围岩,隧洞开挖以后总体以脆性破坏为主,可以认为大理岩本身并不具备传统意义上理解的软岩的流变特性,但是在监测过程中和现场的破坏现象中,都

观察到了滞后破裂的现象(图1)。现场主要的表现是开挖后相当完整的大理岩,当掌子面向前推进到一定距离,完成二次应力调整后,大理岩的破裂依然发展,而且一直持续进行,破裂的深度远大于掌子面开挖后的情形,最终导致喷层开裂和剥落,锚杆失效,严重影响了隧洞的整体稳定性。



图1 完整大理岩滞后破裂现象

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(51109221);浙江省博士后择优资助(2011-bsh-019)

作者简介:刘宁(1981—),男,山东烟台人,高级工程师,博士,主要从事岩石力学与水电工程研究。E-mail:liu_n@ecidi.com

可以预见,随着锦屏二级水电站施工期的结束,隧洞围岩的长期稳定性将成为工程关心的首要岩石力学问题。虽然已经在锦屏二级水电站深埋隧洞实践过程中认识到了深埋条件下大理岩存在破裂和破裂随时间发展的特性,也对其潜在工程危害有了一定的认识,但是定量评估大理岩这种复杂的力学行为并非易事,涉及从基本理论到工程应用过程中一系列环节的研究工作和现场实践。由此可见,研究并解决好这一问题,对深埋条件下岩体力学特性的研究具有重要的理论意义,同时对岩石地下工程的优化设计和施工具有重大的应用价值。

1 脆性岩石时效破坏的研究现状

首次认识到脆性岩石破裂随时间扩展的现象可追溯到 20 世纪 70 年代,瑞士一交通隧洞贯通 2 a 后,当人们再次进入到施工横通道时发现原来十分坚硬完整的花岗岩已经片状化,脆性围岩破裂随时间发展的特征十分明显^[1]。在发现这一现象以后,人们开始着手研究岩体在高应力条件下的破裂行为,但因为问题的复杂性,直到 20 世纪 90 年代,在加拿大 URL 的建设中人们才开始比较系统地研究这一问题^[2],通过启裂强度和损伤强度来描述岩石的破裂特性,但是破裂发生和发展可以出现在弹性阶段,使得传统的力学概念、理论和描述方法难以描述破裂行为。

Fairhurst^[3]在总结了 URL 的相关研究成果以后,给出了荷载-变形-时间三轴关系图,其中纵轴为荷载,两条横轴中的一条为变形,荷载-变形关系构成了传统的岩体本构关系。在三轴关系图中还存在一条轴线,即时间轴,它显示岩体的荷载-变形关系不是一成不变的,而是随时间变化,即岩体特性随时间变化。

1985 年 Schmidtke 和 Lajtai 发表了一篇关于脆性岩石长期强度的文章^[4],分析了花岗岩和火成岩在核废料储存中长期的力学行为。在长期加载过程中,两种岩石都受到长期荷载的影响,它们的强度大约能够降低到 60% 的瞬时强度,持续时间从几秒到 17d。试验结果说明在 1 000 m 的地下储藏核废料会受到时间和周围高地应力的影响。Schmidtke 和 Lajtai 的试验便是著名的疲劳破坏试验。

在应力作用下控制裂纹扩展的化学过程称为应力腐蚀。典型的试验便是 Charles^[5]于 1958 年完成的,他提出水通过破坏硅氧之间的强力化学键来进行腐蚀,取而代之的是稍弱的硅羟基链接。在这个反应中,硅酸盐中的碱离子扮演了催化剂的角色。由于岩石是一种多矿物成分的材料,每种矿物成分以及交界处都是化学反应的理想场所,可以认为,岩

石应力腐蚀亚临界裂纹扩展是由于在拉应力作用下裂纹尖端物质的扩散和尖端物质与环境中的腐蚀介质发生化学反应使化学键断裂这两种机理联合作用的结果。

目前看来,应力腐蚀可以作为脆性岩石时间效应的主要控制因素,通常发生在岩石的缺陷中,而这些缺陷在传统的断裂力学中作为裂纹来处理,两者的尺度并不统一。由上面的分析可知,脆性岩石的破裂主要受微观结构控制,因此应力强度因子并不能很好地代表裂纹尖端的应力场,只有当大量的微裂纹汇聚成一条宏观裂纹时,才比较合适,因此必须发展一种新的方法来代替断裂力学对裂纹进行描述。

颗粒流程序 PFC (particle flow code) 在描述破裂和裂纹扩展方面有着得天独厚的优势。与其他任何传统的数值方法不同,PFC 是从介质的最基本结构的微力学行为来模拟介质的宏观岩体力学特性,因此 PFC 可以更加合理地模拟岩石的破裂扩展^[6-7]。PFC 中的颗粒尺度的节理会引起拉应力而加速腐蚀过程,而这些节理与断裂力学模型中的裂纹不同。由于 PFC 能够支持与微观结构特征相关的颗粒尺度节理的模拟,因此会比断裂力学模型更加合理地模拟岩石中真实的物理力学性能,再现应力腐蚀这一物理现象。

Potyondy^[8]通过在黏结颗粒模型 BPM (bonded-partical model) 中的平行黏结公式中引入损伤速率这一概念,来模拟硅酸盐岩体在水的作用下的应力腐蚀行为,在 BPM 模型中力的传递和转移在不同的地方将产生微张力,并假定在微张力产生的地方存在应力腐蚀行为。当荷载超过岩体的启裂强度后,在给定的速率下减小颗粒之间的黏结材料的几何尺寸来反映应力腐蚀的特征。在每一次计算中全局的应力进行重分布,而黏结材料的移除可以通过两种方式来实现,一是黏结材料的破坏(其应力超过其强度),二是黏结材料几何尺寸为零,这种模型被称为 PSC 模型(parallel-bonded stress corrosion model)。

2 大理岩的破裂特性

隧洞开挖以后围岩会出现损伤和应力重分布现象,这种应力变化在不同性质围岩中产生不同的现场现象。锦屏二级水电站大理岩具有脆-延转换特性^[9],即在靠近开挖面低围压条件下表现出脆性,高应力作用下的脆性岩体会很普遍地出现破裂损伤现象,由于损伤往往开始出现在应力水平相对不高(如 40% 的峰值强度)的条件下,锦屏二级水电站引水隧洞围岩开挖以后的应力普遍超过这一水平,因

此损伤问题非常普遍,这种损伤尽管现在还不能引起岩体强度和力学特性的急剧变化,但随着工程的进展,损伤向着破裂的方向扩展,可能给引水隧洞运行期间的安全留下了隐患。

图2为埋深约2000 m处钻孔取样的应力和应变关系曲线。当轴向压力小于20 MPa时,岩样经历了一个裂纹压密过程,对应的轴向应变约为0.10%。显然,岩样中存在一些与加压方向大角度相交的裂纹,使得加载初期即出现这种压密响应。可能正是这种纵向初始裂纹占主导地位,岩样中没有形成占优势的共轭剪切破坏面,影响了破坏阶段裂纹扩展规律,使得破坏前的破裂扩展不如预期突出。岩石达到峰值强度时对应的轴向应变为0.35%,如果减去压密段的0.10%,应变量为0.25%,横向应变不足0.10%。即白山组大理岩破坏前的变形量很小,从岩石特性角度看,完整大理岩开挖以后的主要问题不是变形,而是破裂。

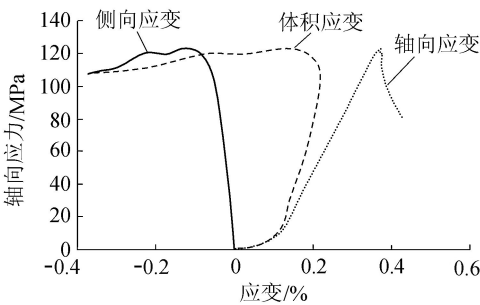


图2 岩样压缩试验过程曲线

同样锦屏二级水电站大理岩在开挖过程中也表现出了破裂的特征,体现了岩体强度和应力水平之间的尖锐矛盾。图3为锦屏二级水电站大理岩肉眼可见的破裂,一般保持和开挖面平行。破裂一般表现出以下3个基本特点:①宏观破坏深度和范围不大,对施工安全影响小而被忽视;②宏观破坏区内部存在一个细观或微观的破损区,可以被声发射或声波测试所检测;③宏观破裂和细观损伤都存在明显的时间效应,即随时间推移不断加剧。



图3 辅助洞东端11号横通道边墙出现的片状破坏^[10]

破裂损伤区的存在对围岩施工安全影响不大,但会影响永久支护和围岩运行期的安全,特别是破

裂损伤区对岩体强度的降低和裂缝扩展导致的渗透性能的改变。

3 大理岩破裂扩展时间效应的现场认识

3.1 现场表现

a. 滞后破裂。新开挖面完整围岩在经历一段时间以后出现破碎现象,比如在锚杆孔造孔施工过程中出现碎片掉落现象(图4),现场巡视中也往往可以看到围岩破裂总是落后掌子面一段距离(图5),可以比较明显地看出破裂开始的分界线,从该分界线开始往后,开始持续出现破裂现象,破裂的深度达到30 cm。



图4 钻孔塌孔



图5 滞后掌子面破裂扩展情况

b. 锚杆受力。滞后掌子面约100 m后安装的锚杆应力计可以普遍受力,由于掌子面开挖不影响监测部位的围岩应力,因此,锚杆受力主要反映了围岩破裂随时间的扩展。从图6可以看出,距离洞壁

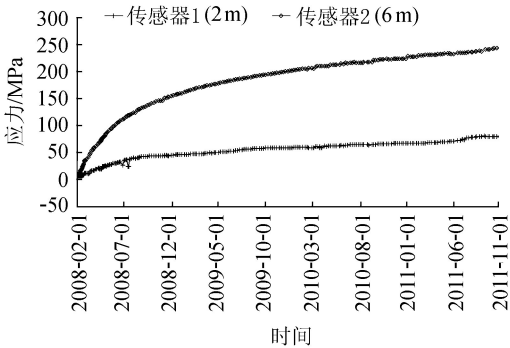


图6 锚杆应力计实测应力过程线

6 m 处的传感器显示锚杆承受的最大应力已经超过了 200 MPa,已经超出了锚杆的受力极限,在将近 3 a 的时间中一直保持较快的增长。而 2 m 处的传感器在安装初期几个月内保持一定的增长,以后便基本保持不变,说明 2 m 深度处的破裂已经发展得比较充分,锚杆已经无法提供抗力。

c. 破裂扩展。锦屏二级水电站引水隧洞采用钻爆法分上下台阶开挖,滞后掌子面数千米的下半断面开挖过程中所揭露的围岩破裂区深度远大于掌子面开挖后的情形。图 7 中的洞段距离隧洞上半洞开挖大约 1 a 的时间,现场看到该洞段腰线部位的围岩破裂现象十分普遍,并且破裂深度较深,围岩破裂的扩展导致破裂面张开 2 cm 左右,而且随着时间的推移,这一破裂面的张开宽度还将进一步的增大,成为地下水流动的重要通道,说明上台阶开挖以后二次应力作用下的围岩破裂随时间不断扩展。

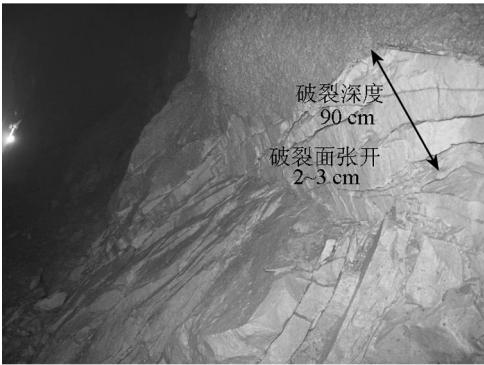


图 7 底板开挖后腰线位置破裂情况

d. 声波测试。与破裂随时间扩展一致,更深一些的围岩损伤程度和发育深度也随时间不断扩展。同一钻孔不同时间进行的声波测试结果显示,随时间推移,钻孔低波速带深度增大。表 1 为开挖完成后布置的 10 个长期声波观测孔(具体位置见图 8)的 5 次测试成果,可以看出,间隔 5 个月围岩松弛深度平均增加了 50 cm。这一监测成果证明了破裂随时间发展的特点。

3.2 工程影响

锦屏二级水电站工程现场围岩的破坏、长期声波观测孔的声波测试成果、二次落底开挖过程中底板的损伤以及锚杆应力监测成果都反映了大理岩损

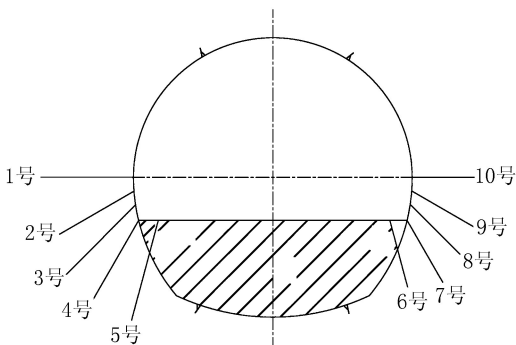


图 8 隧洞断面长期声波观测孔分布

伤随时间发展的特征,必将导致围岩的损伤区深度随着时间而增长。一方面,破裂损伤的发展使得锚杆的应力水平相当高,开挖 1 a 后已经有锚杆的应力超出其抗拉强度,随着工程的进展,大理岩破裂损伤进一步随时间扩展,将很有可能导致锚杆应力普遍接近其抗拉极限,甚至大范围出现超出抗拉极限的现象;另一方面,破裂损伤随着时间向围岩深部的扩展,导致损伤程度的增加以及破裂面的张开等,这些破裂面的存在以及损伤裂纹的扩展为地下水活动提供了重要通道,将对隧洞长期稳定产生重大影响,特别是在喷锚支护作为永久过流断面的洞段,隧洞在内外水压力的长期作用下,支护系统的有效性和安全性将存在巨大的风险,因此有必要开展针对深埋脆性岩石破裂扩展时间效应的研究,保证引水隧洞的长期稳定。

4 大理岩破裂扩展时间效应的数值模拟

为了验证锦屏二级水电站大理岩破裂扩展的时间效应,开展了大理岩的静态疲劳破坏试验^[11],结果见图 9。破坏时间曲线纵坐标采用破坏时间 t_f 的对数,而横坐标采用驱动应力比,即 $\sigma/\sigma_c = (\sigma_1 - P_c)/(\sigma_f - P_c)$,其中 σ_1 为静态疲劳试验中轴向施加的应力; P_c 为施加的围压; σ_f 为常规压缩试验中测得的峰值强度; σ 为静态疲劳试验中的偏应力,且 $\sigma = \sigma_1 - P_c$; σ_c 为常规压缩试验中的偏应力,且 $\sigma_c = \sigma_f - P_c$ 。采用 Potyondy^[8] 提出的应力腐蚀模型 PSC 对试验成果进行了复核验证,模拟结果与实验室中的静态疲劳破坏试验的结果比较吻合,表明通过在

表 1 不同时间声波测试成果

测试时间	各观测孔的松弛深度/m									
	1 号孔	2 号孔	3 号孔	4 号孔	5 号孔	6 号孔	7 号孔	8 号孔	9 号孔	10 号孔
2009 年 5 月	3.01	3.25	3.63	3.34	3.70	1.73	2.46	2.11	2.44	1.52
2009 年 6 月	3.32	3.50	4.11	3.50	3.84	1.85	2.51	2.26	2.48	1.89
2009 年 7 月	3.45	3.67	4.24	3.58	4.06	2.08	2.56	2.57	2.49	2.01
2009 年 12 月	3.52	3.68	4.31	3.67	4.25	2.56	2.74	2.84	2.52	2.23
2010 年 4 月	4.32	3.92	4.52	4.45	4.63	3.22	3.27	3.34	3.27	2.87

颗粒流程序 PFC 中引入损伤速率的概念形成的 PSC 模型能够较好地再现脆性岩石中的应力腐蚀作用。

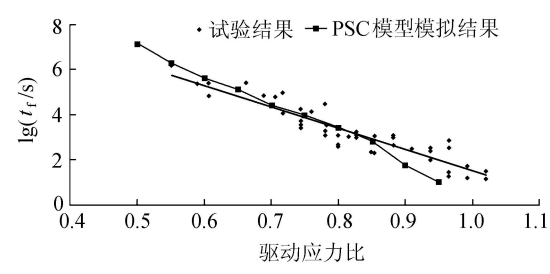


图9 大理岩破裂时间效应的静态疲劳破坏试验

5 结 语

与我国其他地下水电工程相比,锦屏二级水电站深埋引水隧洞显然有其特殊性,对深埋条件下岩体强度的认识和参数指标的确定方法,很可能全面超越水电行业既有的规程规范,其中深埋岩体强度的时间效应问题的研究便是一个全新的研究课题。目前世界上关于此问题的研究成果并不多见,因此解决破裂扩展问题需要采用全新的工作思路,去获得大理岩强度随时间变化特性的认识,丰富岩石力学理论,解释和定量估计隧洞围岩破裂随时间的变化特征,满足引水隧洞长期稳定安全运行的需要。

参考文献:

[1] 锦屏二级水电站引水隧洞围岩稳定、动态支护设计专题研究;2010 年阶段性总结报告[R]. 武汉:Itasca(武汉)咨询有限公司,2010.

[2] READ R S. 20 years of excavation response studies at AECL's underground research laboratory[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2004,41 (8):1251-1275.

[3] FAIRHURST C. Nuclear waste disposal and rock mechanics: contributions of the Underground Research Laboratory (URL), Pinawa, Manitoba [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41 (8): 1221-1227.

[4] SCHMIDTKE R H, LAJTAI E Z. The long-term strength of Lac du Bonnet granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,1985,22(6):461-465.

[5] CHARLES R J. Static fatigue of glass[J]. J Appl Phys, 1958,29(11):1549-60.

[6] CUNDALL P A, POTYONDY D O, LEE C A. Micromechanics-based models for fracture and breakout around the mine-by experiment tunnel[C]//Designing the Excavation Disturbed Zone for a Nuclear Repository in Hard Rock Proceedings, EDZ Workshop. Winnipeg: Canadian Nuclear Society,1996,113-22.

[7] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock [J]. International Journal of Rock

Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41 (8): 1329-1364.

[8] POTYONDY D O. Simulating stress corrosion with a bonded-particle model for rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2007,44(5): 677-691.

[9] 张春生,陈祥荣,侯靖,等. 锦屏二级水电站深埋大理岩力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29 (10):1999-2009. (ZHANG Chunsheng, CHEN Xiangrong, HOU Jing, et al. study of mechanical behavior of deep-buried marble at jinping ii hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (10):1999-2009. (in Chinese))

[10] 刘宁. 深埋大理岩破裂扩展的时间效应及隧洞长期稳定性评价[R]. 杭州:华东勘测设计研究院,2011.

[11] 刘宁,张春生,褚卫江. 深埋大理岩破裂扩展时间效应的颗粒流模拟[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30 (10):1989-1996. (LIU Ning, ZHANG Chunsheng, CHU Weijiang. Simulating time-dependent failure of deep marble with particle flow code [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (10): 1989-1996. (in Chinese))

(收稿日期:2012-05-15 编辑:熊水斌)

(上接第46页)

[10] HOUSER P R, MICHEAL B, BRIAN C, et al. A global land data assimilation scheme (GLDAS) [J]. Bulletin of the American Meteorological Society,2004,85(3):381-394.

[11] RODELL M, HOUSER P R, JAMBOR U, et al. The global land data assimilation system [J]. Bulletin of the American Meteorological Society,2004,85(3):381-394.

[12] STEASSBERG G, SCANLON B R, RODELL M. Comparison of seasonal terrestrial water storage variations from GRACE with groundwater level measurements from the High Plains Aquifer (USA) [J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34 (L14402, doi: 10.1029/2007GL030139).

[13] Ministry of geology and mineral resources, People's Republic of China. Geological memoirs [M]. Beijing: Geological Publishing House,1988:202-204

[14] YANG Y, ZHANG X, WATANNBE M, et al. Optimizing irrigation management for wheat to reduce groundwater depletion in the piedmont region of the Taihang Mountains in the North China Plain [J]. Agricultural Water Management,2006,82:25-44.

[15] MOIWO J P, YANG Y, HAN S, et al. A method for estimating soil moisture storage in regions under water stress and storage depletion; a case study of Hai River Basin, Northern China [J]. Hydrological Processes,2011, 25:2275-2287.

(收稿日期:2012-06-06 编辑:熊水斌)