

坚硬围岩初期支护合理时机研究^{*}

朱泽奇¹, 盛 谦¹, 刘继国², 朱付广¹

(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, 武汉 430071;
2. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 武汉 430056)

摘 要: 针对某水电站业已完成的地下厂房第一期开挖开展坚硬围岩初期支护的合理时机研究。首先, 根据地下厂房围岩变形监测资料, 研究分析了围岩位移变化率的时间效应及坚硬围岩的应力释放特征; 其次, 借助二维有限元分析软件 Phase², 通过指定不同的应力释放系数来模拟不同的洞室支护时机, 计算结果表明在不同应力释放阶段, 围岩自承载能力和围岩变形均表现出阶段性发展的趋势; 随支护时机推迟, 支护应力减小, 围岩塑性区和开挖变形量增大; 同时考虑坚硬围岩应力释放的时间效应, 研究围岩变形特征曲线, 为初期锚喷支护的设置时机提供了可以测量、控制的研究手段。最后, 综合不同支护时机下的支护抗力和围岩应力、变形分析表明: 针对该水电站地下厂房坚硬围岩, 应力释放达约 60~70% 或开挖通过施工断面 15 d 左右是一个较为有利的支护时机。计算结果符合地下工程施工过程的一般规律, 对于该水电站地下厂房正在进行的开挖支护活动具有很好的参考价值。

关键词: 水电站; 坚硬围岩; 支护时机; 应力释放

中图分类号: TU457 文献标识码: A 文章编号: 1673-0836(2010)06-1240-06

Study on Primary Supporting Time for Hard Surrounding Rockmass

Zhu Zeqi, Sheng Qian, Liu Jiguo, Zhu Fuguang

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. China Second Highway Survey Design and Research Institute of Communications, Wuhan 430056, China)

Abstract: For the first-phase excavation of underground powerhouse in a hydropower project, the primary supporting time of hard surrounding rockmass is studied. Firstly, the time effect of displacement rate and stress releasing characteristics of the hard surrounding rockmass are analyzed based on deformation monitoring. Then, the different supporting schedules are simulated with the corresponding stress releasing coefficient by the two-dimensional FEM software Phase². The result shows that the bearing capacity and deformation development of surrounding rockmass exhibit staged characteristics with different stress releasing coefficients, and support stress becomes less, the excavation displacement and rock plastic zone becomes larger with the supporting time postponed. A new method to study primary supporting time of hard surrounding rockmass is provided by considering time effect of deformation curve. Finally, based on calculation results with different supporting time, it reveals that it is an appropriate time to support when the stress releasing coefficient reaches to about 60~70% or excavation of some construction section passes through approximately 15 d. The analysis methods have been verified and have some reference value for the further study on ex-

* 收稿日期: 2010-05-04(修改稿)

作者简介: 朱泽奇(1980-)男, 湖北黄石人, 博士, 助研, 主要从事数值岩石力学与工程和围岩稳定性方面研究工作。

E-mail: zhuzeqi2005@tom.com

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划重点项目(90715042); 973国家重点基础研究发展计划(2010CB732001); 国家科技支撑计划(2006BAB04A06)

cavation and support of the hydropower project

Keywords: hydropower project; hard surrounding rock mass; supporting time; stress release

1 引言

在实际工程中,有的工程围岩非常破碎,而有的工程围岩比较完整,但是在相同的锚喷支护参数条件下,却出现了前者围岩稳定而后者围岩失稳的现象。这些现象引起人们的思考,使人们认识到洞室支护存在合理的支护时机问题。

新奥法理论是锚喷支护合理时机最初的理论基础,因为由新奥法开始围岩的自承载能力在隧洞工程支护中开始扮演重要角色,而围岩自承载能力的确定正是确定最佳支护时机的关键因素。锚喷支护虽然可以增强围岩承载拱的承载能力,但是人们不能用无限制的增加锚喷支护的强度来减弱二次衬砌的压力,因为我们必须面对实际工程施工的可操作性和工程总体造价的现实问题,而围岩适度的变形又是节约锚喷支护材料的有效方法。因此寻找和确定锚喷最佳支护时机,成为洞室工程支护技术的核心。

随着岩石理论的发展及基于计算机技术的数值分析方法的推广,在研究地下洞室围岩失稳机理和支护受力机理以及新的设计理论和设计方法方面取得了积极的进展^[1~9]。文献[7]根据地下洞室开挖释放荷载计算基本原理求得开挖荷载的等效节点力,并以等效节点力不同的施加比例模拟不同的洞室支护时机;文献[8]从控制岩爆的角度进行了苍岭隧道初期支护时机的探讨;文献[9]对掌子面推进过程中围岩的应力状态进行分析和研究,在考虑三维应力旋转的基础上进行衬砌支护时机的选择。这些工作对有限元方法在坚硬围岩支护时机优化分析中的应用进行了有益探讨,但缺乏对坚硬围岩变形特性及其应力释放特征的研究。

本文以某水电站地下厂房开挖工程为例,结合地下厂房开挖变形监测资料,在研究坚硬围岩的应力释放特征基础上,借助二维有限元 Phase2 模拟不同的洞室支护时机,通过比较不同支护时机下的围岩应力、变形及塑性区综合研究该水电站地下厂房第一期开挖的最佳支护时机。该方法方便可行,对于该水电站地下厂房正在进行的开挖支护活动具有很好的参考价值。

2 工程背景

某水电站坝址位于四川省大渡河中游上段雅

安市石棉县挖角乡境内。地下厂房系统采用主副厂房、主变室、尾水调压室三大洞室平行布置,岩柱厚度均为 47.50 m。主厂房开挖尺寸 206.00 m×30.80 m×73.78 m(长×宽×高),主变室开挖尺寸 144.00 m×18.80 m×25.10 m(长×宽×高)。尾水调压室采用阻抗式,长 130.00 m,净跨度 20.50 m~24.00 m,室高 75.08 m。尾水隧洞为有压洞,隧洞断面形式为圆拱直墙型,断面净尺寸为 15.20 m×16.70 m(宽×高)。

2.1 岩体结构

地下厂房洞室群位于坝轴线下游左岸花岗岩山体中,厂房区岩体新鲜较完整,呈块状一次块状结构,岩块嵌合紧密,无区域断裂切割,构造型式以沿脉岩发育的挤压破碎带、断层和节理裂隙为特征。厂区较大规模的软弱结构面主要有 $\delta 6 \sim 60$ 等断层穿过厂房洞室群区。地下厂房区岩脉以辉绿岩脉分布较多,脉岩出露宽度一般 0.5 m~1.0 m,最大宽度达 3.0 m,其中宽度大于 5 m 的辉绿岩脉共计 41 条,宽度大于 2 m 的辉绿岩脉约 77 条,主要为陡倾角。地下厂房区延伸较长的辉绿岩脉有 $\beta 6, \beta 9, \beta 80$ 和 $\beta 81$ 等,对地下厂房围岩的稳定性影响较大。

2.2 岩体力学参数

根据 GB 50287—99《水利水电工程地质勘察规范》将坝区工程岩体质量分为 II、III、IV、V 共 4 类。根据相关试验结果,地下洞室群围岩物理力学参数见表 1 所示。

表 1 岩体力学参数表
Table 1 Parameters of rock masses

岩性	E (GPa)	ν	容重 (kg/m^3)	φ ($^\circ$)	c (MPa)
II 类	20	0.25	2.65×10^3	25	0.2
III 类	7.5	0.3	2.62×10^3	31	0.5
IV 类	3	0.35	2.58×10^3	45	1.0
V 类	0.7	0.37	2.45×10^3	50	1.6
断层、岩脉	0.3	0.39	2.2×10^3	21	0.1

2.3 开挖与支护方案

地下厂房洞室群布置及第一期开挖方案如图 1 所示,第一期开挖包括三大洞室的第一层。

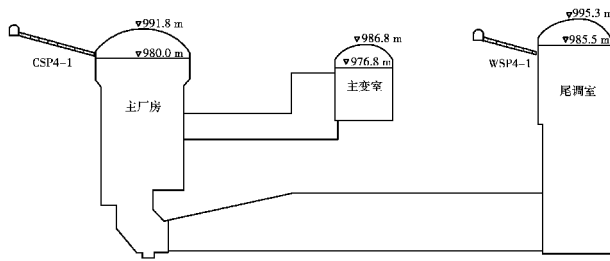


图 1 地下厂房洞室群施工开挖及测试孔布置示意图
 Fig 1 Construction program of the underground powerhouse and monitoring points in the No. 4 section

地下厂房洞室围岩总体以 II 类为主, 局部洞段为 III 类围岩。依据围岩等级初步拟定支护方案: 锚杆类型为预应力锚杆和普通砂浆锚杆相结合的形式, 梅花型布置。I 类围岩: 预应力锚杆长 9 m, 普通砂浆锚杆长 6 m, 布锚间距都为 1.5 m; III 类围岩: 预应力锚杆长 9 m, 普通砂浆锚杆长 6 m, 布锚间距都为 1.2 m。

3 应力释放系数研究

根据新奥法的基本理念, 隧道开挖后, 围岩从变形到破坏有一时间历程, 其包括开挖面向前推进、围岩应力逐渐释放的时间效应和围岩介质的流变效应, 该水电站地下厂房因围岩条件较好, 岩石的流变效应可以忽略, 而应主要考虑应力逐渐释放的时间效应影响^[10]。因此, 对应力释放系数的研究进而选定合适的时机施作初期支护将具有重要的现实意义。

对于应力释放系数的研究, 很多学者做了有价值的探索, 并总结出很多方法, 但目前常用的方法主要有以下两种^[8, 11-13]: (1) 根据监测资料获取位移变化率来加以确定; 通常近似地将它定义为本阶段围岩控制点的变形值与施工完毕变形稳定后该控制测点总变形的比率; (2) 按工程类比法加以选定, 并根据试算结果予以修正等。本文在现场监控资料的基础上, 采用第 1 种方法对应力释放系数大小进行研究, 进而提出适当的支护时机。

为研究水电站地下厂房洞室群围岩变形, 在地下厂房 2 号、4 号机组中心线附近选择两个变形跟踪测试断面, 在第一、第二层排水廊道与主厂房、尾调室之间分别布置 2 个预埋变形测试孔。对于 4 号机组监测剖面: CSP4-1 和 WSP4-1 为滑动测微计变形测试孔, 用于监测沿着监测孔轴线方向的岩体累积变形 (具体布置见图 1)。

WSP4-1 的全孔累计位移—时间曲线。图 3 为 CSP4-1 和 WSP4-1 的全孔累计位移变化率—时间曲线。

由 CSP4-1 测试孔的累积位移—时间曲线可以看出, 目前测试孔所监测部位的岩体发生了向地下厂房洞室开挖临空面的伸长变形, 截止到 2009 年 03 月 26 日 (第一期开挖完成), 全孔向洞室表面的累积位移为 1.095 2 mm。在测试初期, 全孔累计位移数值较小, 且增长缓慢; 2008 年 12 月 18 日左右, 主厂房开挖通过测试断面, 随后约 10~15 d 全孔累计位移增加迅速, 达到总变形的 60~70% (图 3); 随着开挖远离测试断面, 全孔累积位移增加速度变缓, 约经过 60 d 后变形逐渐趋于稳定; 同样, WSP4-1 全孔累积位移为 0.670 3 mm。在测试初期, 全孔累计位移数值较小, 且增长缓慢; 2008 年 11 月 21 日左右, 尾调室开挖通过测试断面, 随后约 20 d 全孔累计位移增加迅速, 达到总变形的 60% (图 3); 随着开挖远离测试断面, 全孔累积位移增加速度变缓, 约经过 60 d 后变形逐渐趋于稳定。

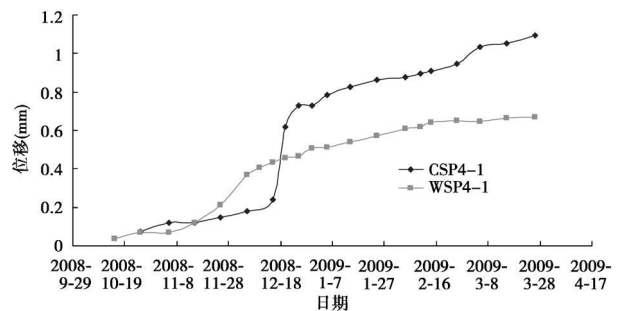


图 2 全孔累积位移—时间曲线

Fig 2 The displacement time curves

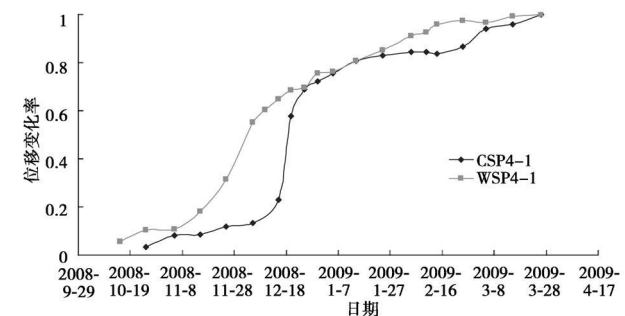


图 3 位移变化率—时间曲线

Fig 3 The displacement ratio time curves

通过以上分析可知, 随着时间历程的发展, 应力释放系数逐渐变化。在洞室开挖之后 (约 15 d 左右) 洞周应力将释放约 60~70%; 经过约两个

月时间,围岩的二次应力场基本调整完毕。

4 计算模型与分析方案

本文计算是在地下厂房前期研究资料的基础上,依据本区段构造应力的分布特征,选取典型断面4号机组剖面进行了弹塑性数值模拟计算,在计算中,按现场的实际施工步骤进行地下厂房第一期开挖支护模拟,同时考虑开挖后洞周应力逐渐调整这一实际情况,即洞室开挖后,围岩从变形到破坏有一变化过程,对于该水电站地下厂房而言,因围岩条件较好,应主要考虑应力逐渐释放的影响,采用了不同的释放系数,并据此来分析在应力释放的不同阶段施加支护措施对洞室稳定性、围岩变形及支护结构抗力的影响。

数值计算模型及边界条件见图4,材料力学参数选取如表1采用加拿大 Rocscience公司的二维有限元分析软件 Phase 2进行应力释放模拟, Phase 2的 load split功能通过加载系数来改变整个模型或局部区域在某一荷载步下的原岩应力,加载系数为正表示增加,为负表示降低原岩应力,本文通过给第一期开挖区域指定不同的加载系数逐步降低开挖体原岩应力,以此来模拟围岩应力释放过程。全部计算方案1~5的支护时围岩应力释放率分别为20%、40%、60%、80%、100%。

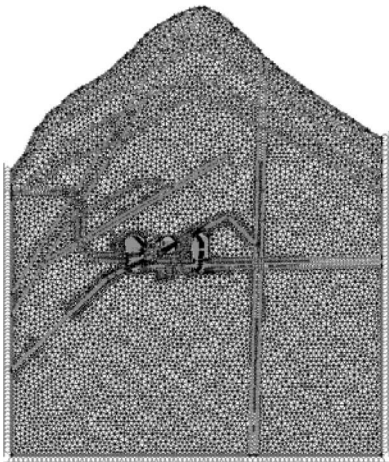


图4 第4号机组剖面的网格剖分
Fig 4 FEM mesh of the No. 4 section

5 计算结果分析

由于篇幅有限,以主厂房第一期开挖完成后顶拱及拱座等关键部位的计算结果作为主要分析依据。图5和图6分别为主厂房第一期开挖应力释放60%和100%时的最大主应力等色区图。

图5和图6说明第一期开挖应力释放过程实际上主要表现为顶拱应力逐渐消散,而在拱座及边墙附近应力迅速集中。到应力释放100%时,顶拱应力达到最小,边墙处应力集中程度达到最高。围岩应力释放的这种表现形式有利于充分发挥围岩的自承载能力^[14],但是当应力释放到一定程度,围岩顶拱应力逐渐消散产生拉应力或拱座附近应力集中达到围岩抗压强度,则又会对围岩自承载能力产生不利影响。

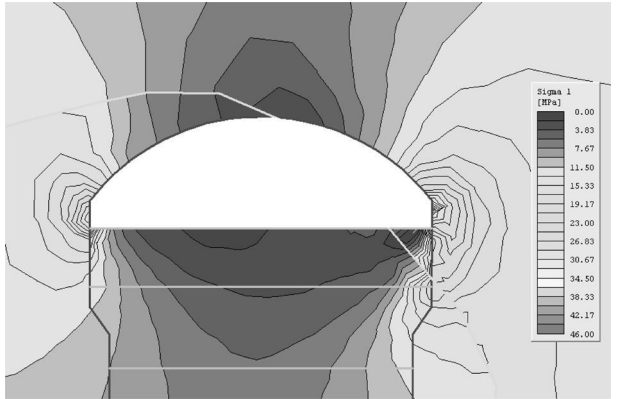


图5 应力释放60%时的最大主应力等色区图
Fig 5 Max principal stress nephogram at releasing coefficient 0.6

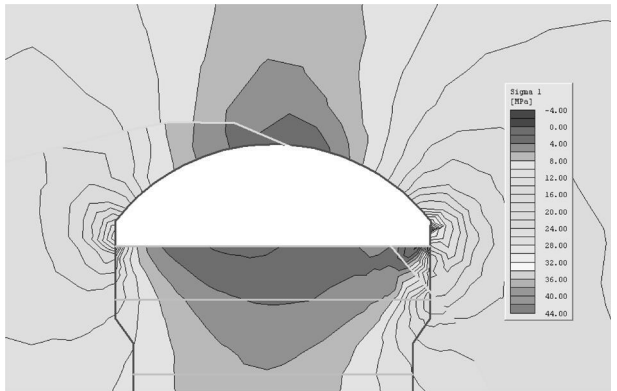


图6 应力释放100%时的最大主应力等色区图
Fig 6 Max principal stress nephogram at releasing coefficient 1.0

图7给出了主厂房一些关键部位的围岩应力与应力释放率的关系。结果表明,围岩自承载能力的形成,即顶拱应力逐渐消散和拱座及边墙附近应力集中,与应力释放系数并不是一个简单的线性关系:随应力释放的进行,围岩自承载能力得到迅速提高和发展,但在应力释放达到约60%后,围岩自承载能力进入较为平稳发展的阶段,此后施加支护对围岩自承载能力的提高影响不大,一般来说,应该在围岩自承载能力达到极限时及时施加支护,如果过早施加支护,则没有最大限度的发挥围岩的自

承载能力。

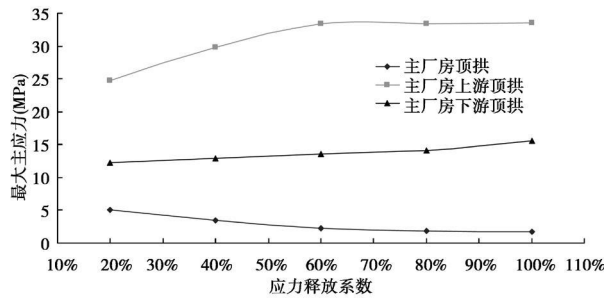


图 7 主厂房关键部位在不同应力释放率下的围岩应力
Fig 7 Max principal stress of surrounding rock mass of the main power house with different stress releasing coefficients

所谓最佳支护时机,就是最大限度的发挥围岩自承载能力,同时又要最大程度的调动围岩变形释放能量,充分调动锚喷支护体系的作用,使二次支护系统的抗力降为最低同时保证支护材料的使用最为合理^[11]。图 8 给出了主厂房关键部位不同应力释放率下的围岩变形。图 8 说明,在不同应力释放阶段,围岩变形表现出阶段性发展的趋势,当应力释放达到约 60~80% 时,围岩变形进入一个发展较慢或基本不变的阶段,此时围岩自承载能力基本上达到极限,但围岩变形是否充分,是否有利于调动支护体系作用,又不致影响围岩稳定,还需要综合考虑支护抗力、围岩开挖总变形及围岩塑性区等因素。

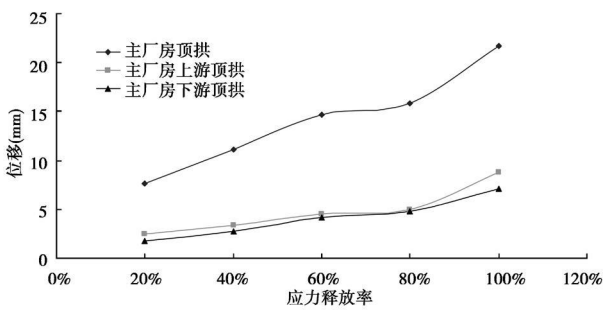


图 8 主厂房关键部位在不同应力释放率下的围岩变形
Fig 8 Deformation of surrounding rock mass of the main power house with different stress releasing coefficients

水电站地下厂房第一期开挖计算中,为研究最佳支护时机,支护前地应力释放一部分,支护后释放一部分再进行开挖模拟,其中前一部分荷载由围岩单独承担,后一部分荷载由支护和围岩共同承担。为了研究锚杆支护抗力受支护时机的影响,以主厂房上游拱座部位的砂浆锚杆为例,研究地应力释放一部分后施加支护,考察此时的锚杆应力可以了解锚杆分担的开挖释放荷载。图 9 给出了锚杆

平均应力与应力释放率的关系。图 9 说明支护时间越早,锚杆分担的开挖释放荷载越多,随支护时机的推迟,支护应力逐渐减小,应力释放约 40% 后,支护抗力减小较快。

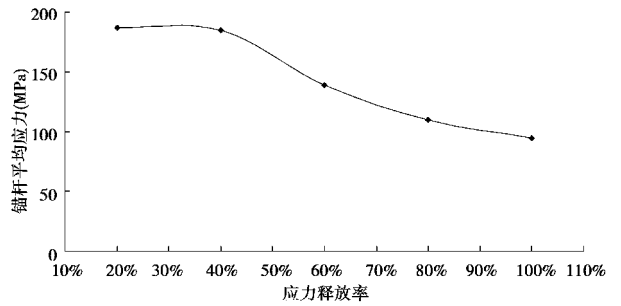


图 9 锚杆平均应力与应力释放率的关系
Fig 9 Relationship between support stress and stress releasing coefficients

进一步为了考虑不同支护时机下的围岩稳定性,图 10 给出了主厂房围岩关键部位最终开挖变形与支护时机的关系,图 11 给出了支护时机为应力释放 60% 及 100% 的最终围岩开挖塑性区对比。需要指出的是这里的应力释放 100% 并不等同于开挖模拟,要获得最终的开挖变形必须进行开挖计算,因为后者不但考虑剩余应力释放,还涉及开挖面边界条件的改变。

图 10 和图 11 说明不同支护时机对于围岩最终开挖变形影响较小,但对于围岩开挖塑性区影响较大,尤其是洞室顶拱及边墙,这是围岩稳定评价中应引起重视的问题。总的来说,支护过晚,则围岩塑性区及开挖变形增大,不利于围岩稳定。

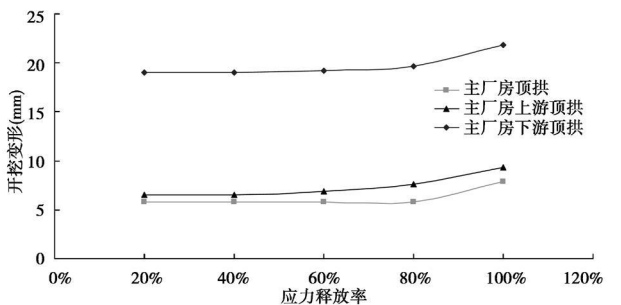
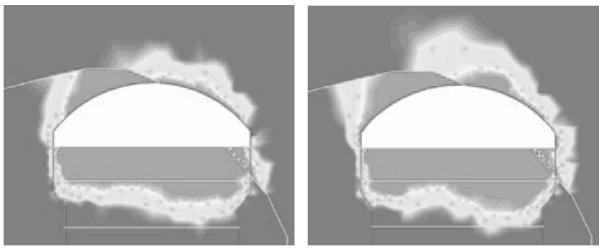


图 10 主厂房关键部位不同支护时机下的围岩开挖变形
Fig 10 Excavation deformation of surrounding rock mass of the main power house in different supporting time

图 1 中的测试孔 CSP4-1 和 WSP4-1 只能测量局部围岩变形,结合坚硬围岩的应力释放特征研究,考虑图 3 的应力释放时间效应,在图 8 中引入相对应的时间关系,得到主厂房关键部位施工期围岩变形特征曲线(图 12)。对比图 2 由图 12 可以



(a) 支护时机为应力释放60% (b) 支护时机为应力释放100%

图 11 主厂房不同支护时机下的围岩开挖塑性区

Fig 11 Excavation plastic zone of surrounding rock mass of the main power house with different supporting time

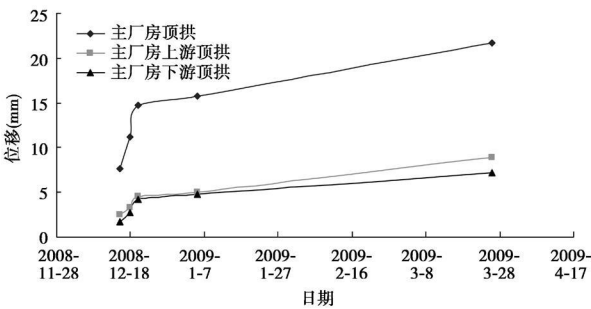


图 12 主厂房关键部位施工期围岩变形特征曲线

Fig 12 Deformation characteristic curves of surrounding rock mass of the main power house during construction

非常直观地看出,坚硬围岩变形表现为初期迅速提高,当应力释放达到 60~70%或开挖通过施工断面 15 d左右进入发展相对较为缓慢的变形能释放阶段。坚硬围岩这一变形特征可以方便确定围岩变形稳定的时机,从而为初期锚喷支护的设置时机提供了可以测量、控制的研究手段。

6 结论

本文基于坚硬围岩的应力释放特征研究,结合二维有限元不同支护时机数值模拟分析,得到一些有益的结论:

(1)通过现场监测资料分析,发现地下厂房坚硬围岩应力释放迅速,施工通过开挖断面约 15 d左右,应力释放达到约 60~70%,经过约两个月时间,围岩的二次应力场基本调整完毕。

(2)在不同应力释放阶段,围岩自承载能力和围岩变形均表现出阶段性发展的趋势。随支护时机推迟,支护应力减小,围岩塑性区和开挖变形量增大,这符合地下工程一般规律,说明了本文研究思路和计算方法的可行性。

(3)综合不同支护时机下的支护抗力和围岩应力、变形分析。当应力释放达到 60~70%时,围岩自承载能力基本上达到极限,此时的支护抗力较

小(为早期支护抗力的 60~75%),围岩变形较充分(为最终开挖变形的 60~80%)。可以认为,围岩应力释放达约 60~70%或开挖通过施工断面 15 d左右是一个较为有利的支护时机。进一步随支护时机推迟,围岩最终开挖变形及开挖塑性区发展迅速,不利于围岩稳定。计算结果可以反映坚硬围岩应力释放特征,对于该水电站地下厂房正在进行的开挖支护活动具有很好的参考价值。

参考文献 (References)

- [1] 王毅才. 隧道工程 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2002 (Wang Yicai. Tunnel engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2002 (in Chinese))
- [2] 徐干成, 白洪才, 郑颖人, 等. 地下工程支护结构 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003 (Xu Gancheng Bai Hongcai Zheng Yingren et al. Support structures for underground engineering [M]. Beijing: China Water Power Press, 2003 (in Chinese))
- [3] E. T. Brown. Putting the NATM into perspective [J]. Tunnels and Tunneling Summer Special Issue 1990
- [4] Barton Nick, Grimstad Eysteir. Rock mass conditions dictate choice between NMT and NATM [J]. Tunnels and Tunneling Vol.10 Oct 1994 39-42
- [5] T. Kavramoğlu, Y. Fikri, A. T. Akashi, K. Yoda. Deformation and fracture behavior of discontinuous rock mass and damage mechanics theory [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics Vol. 12 1988
- [6] Ş. Hachinohe, N. Hiraki. Rates of Weathering and Temporal Changes in Strength of Bed Rock of Marine Terraces in Boso Peninsula [J]. Japan Engineering Geology and International Journal Vol. 55 nos 1-2 2000 29-43
- [7] 苏凯, 伍鹤皋, 蒋逸超, 等. 不同支护时机的地下洞室围岩稳定仿真 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2008, 41(4): 29-33 (Su Kai, Wu Hegao, Jiang Yichao. Simulation of surrounding rock stability of underground chambers under different support schedules [J]. Engineering Journal of Wuhan University 2008, 41(4): 29-33 (in Chinese))
- [8] 汪波, 何川, 俞涛. 苍岭隧道岩爆预测的数值分析及初期支护时机探讨 [J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 181-186 (Wang Bo, He Chuan, Yu Tao. Study on numerical analysis of rockburst and primary support time in Cangling Tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics 2007, 28(6): 181-186 (in Chinese))

(下转第 1265 页)

- 642-646 (Wang Kai Zheng Yingren Zhou Xiaoliang et al. The research of deformation regulation of slope protection applying the bored pile [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering 2007 3(4): 642-646 (in Chinese)
- [2] 王凯, 郑颖人, 王其洪, 等. 捆绑式抗滑桩优越性初步研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2008 4(3): 533-538 (Wang Kai Zheng Yingren Wang Qihong et al. The Pilot study of the trussed slide resistant pile's advantage [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering 2008 4(3): 533-538 (in Chinese)
- [3] 王凯, 郑颖人. 捆绑式抗滑桩结构及施工方法发明专利 [P]. 中国: ZL2005 1 0020441.9 2005.2.28 (Wang Kai Zheng Yingren. The Trussed Slide-Resistant Pile's Structure & Construction Method invention patent [P]. China: ZL2005 1 0020441.9 2005.2.28 (in Chinese)
- [4] 郑颖人, 陈祖煜, 王恭先, 等. 边坡与滑坡工程治理 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2007. (Zheng Yingren Chen Zuyu Ling Tanqin et al. Engineering Treatment of Slope & Landslide [M]. China Beijing Communications Press 2007. (in Chinese)
- [5] 郑颖人. 岩质建筑边坡岩石压力计算与边坡支护设计 [Q]. 重庆市第二界岩土工程学术研讨会论文集, 1997. (Zheng Yingren. Calculation of rock pressure and design of slope restraining on rock building slope [Q]. The collection of papers for the 2nd geotechnical engineering learned Proseminar in Chongqing 1997. (in Chinese)
- [6] 王凯, 郑颖人, 王其洪, 等. 捆绑式抗滑桩钢筋混凝土模型实验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2008 4(6): 1 027-1 032 (Wang Kai Zheng Yingren Wang Qihong et al. The study of the trussed slide resistant pile's reinforced concrete model experiment [J]. 2008 4(6): 1 027-1 032 (in Chinese)
- [7] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数 [J]. 岩土工程学报, 2002 24(3): 343-346 (Zhao Shangyi Zheng Yingren Shi Weimin et al. Solving safe coefficient of slope's stability by the finite element method with discount intensity [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2002 24(3): 343-346 (in Chinese)
- [8] 建筑边坡工程技术规范 [S]. GB 50330-2002 (Technical code for building slope engineering [S]. GB 50330-2002 (in Chinese)
- [9] 建筑基坑支护技术规程 [S]. JGJ 120-99 (Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations [S]. JGJ 120-99 (in Chinese)
- [10] 混凝土结构设计规范 [S]. GB 50010-2002 (Code for design of concrete structures [S]. GB 50010-2002 (in Chinese)

(上接第 1245 页)

- [9] 张社荣, 梁礼绘. 考虑三维应力旋转的隧洞衬砌支护时机研究 [J]. 水利学报, 2007 38(6): 704-709 (Zhang Sherong Liang Lihui. Analysis on tunnel liner supporting time considering three-dimensional stress rotation [J]. Journal of Hydraulic Engineering 2007 38(6): 704-709. (in Chinese)
- [10] 孙钧, 朱合华. 软弱岩隧洞施工性态的力学模拟与分析 [J]. 岩土力学, 1994 15(4): 20-32 (Sun Jun Zhu Hehua. Mechanical simulation and analysis of behavior of soft and weak rocks in the construction of a tunnel opening [J]. Rock and Soil Mechanics 1994 15(4): 20-32 (in Chinese)
- [11] 潘昌实. 隧道力学数值方法 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1995 (Pan Changshi. Numerical method for tunnel mechanics [M]. Beijing: China Railway Press 1995 (in Chinese)
- [12] 鄢建华, 汤雷. 水工地下工程围岩稳定性分析方法现状与发展 [J]. 岩土力学, 2003 24 (增 1): 681-686 (Yan Jianhua Tang Lei. Current status and tendency of analyzing methods for stability of rock mass surrounding underground hydraulic works [J]. Rock and Soil Mechanics 2003 24 (Supp 1): 681-686 (in Chinese)
- [13] 王敏强, 许原. 有限元分析中开挖释放荷载计算的讨论 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2001 34 (1): 56-59 (Wang Minqiang Xu Yuan. Discussion of released loads in calculation of excavation by finite element method [J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering 2001 34 (1): 56-59 (in Chinese)
- [14] 蔡美峰. 岩石力学与工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2005 (Cai Meifeng. Rock mechanics and engineering [M]. Beijing: Science Press 2005 (in Chinese)