

地下洞群支护优化设计的综合评价方法

崔臻¹, 盛谦¹, 刘继国², 田乐³

- (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. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056;
3. 黄河规划勘测设计有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要: 在大渡河流域某水电站地下洞群支护优化研究中, 引入基于强度折减法的地下洞群整体安全系数作为围岩支护效果的主要评判指标, 结合洞周最大变形及洞周关键部位收敛率等局部性指标, 通过多种支护方案的对比综合研究, 提出了一种多指标综合优化分析方法。研究表明, 该方法适合于求解具有离散设计变量和非确定性因素的工程设计问题, 对洞群稳定性有较大改善。

关键词: 地下工程; 强度折减; 安全系数; 支护优化

Multiple-index Comprehensive Evaluation Method for the Design Optimization of Underground Cavern Support

Cui Zhen¹, Sheng Qian¹, Liu Jiguo², Tian Le³

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan Hubei 430071; 2. China Second Highway Survey, Design and Research Institute of Communications, Wuhan Hubei 430056; 3. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou Henan 450003)

Abstract: The overall safety factor of underground cavern based on shear strength reduction method was introduced into the study on support optimization for the underground caverns of a hydropower station in Dadu River basin as the main index for evaluating the support of surrounding rock. In combining with the maximum deformation of rock and the convergence rate of key positions and by comparing the different support programs, a multi-index comprehensive optimization analysis was proposed. The study shows that the method is suitable to solve underground engineering design problem with discrete variables and uncertainty factors, and to improve the stability of caverns.

Key Words: underground engineering; shear strength reduction; safety factor; support optimization

中图分类号: TV731.6; TU457

文献标识码: A

文章编号: 0559-9342(2010)12-0008-03

0 引言

我国西南地区已建或新建大型水电工程的地下洞室群的支护设计及其优化研究问题十分突出。现有的支护优化方式多采用支护前后围岩的位移、应力和塑性区作为评价指标进行对比分析^[1], 一些学者试图引入新的评价指标^[2], 但目前对于反映支护效果的洞群全局优化指标研究较少。由于整体安全系数可以客观和定量地给出洞群的整体安全裕度, 从而得以从地面工程推广至地下工程领域^[3-4]。

本文基于前人研究成果, 将洞群整体安全系数作为围岩整体稳定指标, 引入至支护优化研究中。结合洞周变形、关键部位收敛率等局部稳定指标, 形成围岩安全性状改善程度综合评价方法, 并针对

大渡河流域某水电站地下厂房工程进行多方案的优化设计研究, 得到了一些有益的结论。

1 多指标综合优化分析方法

1.1 洞群稳定性综合评价方法

由于开挖卸荷应力的影响, 围岩产生剪切屈服并进入塑性流动, 继而发展成垮塌。在无支护地下洞群整体安全系数计算中, 使用岩墙破损区指标作

收稿日期: 2010-10-15

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划重点项目(90715042); “十一五”国家科技支撑计划(2008BAB29B01-1)资助

作者简介: 崔臻(1986—), 男(土家族), 重庆人, 博士研究生, 主要从事岩石工程数值计算领域的研究工作。

为洞群整体失稳判据；支护后地下洞群处于临界失稳状态的指标为洞室间岩墙破损区贯通。

将由强度折减法得到的安全系数 SF 作为洞群的整体稳定性指标，以洞壁变形最大值 u_{max} 及关键部位相对收敛率 K 作为局部稳定性指标。将以上各指标作为支护优化研究的目标函数，将各支护方案得到的目标函数值进行归一化处理，得到该方案的综合评分 $P(x)$ 。其中，各指标的归一化权重系数由群决策法决定。本文中，整体安全系数取 0.4，洞壁变形最大值取 0.3，关键部位收敛率总量取 0.3。

基于本评价方法的优化目标函数为 $\max P(x)$ ，约束条件为支护结构的直径、长度、间距、布置形式等可行性条件。

1.2 算例

以图 1 的地下洞室群为例，采用表 1 的两种支护方案，以验证本文的洞群稳定性综合评价指标和优化设计方法。

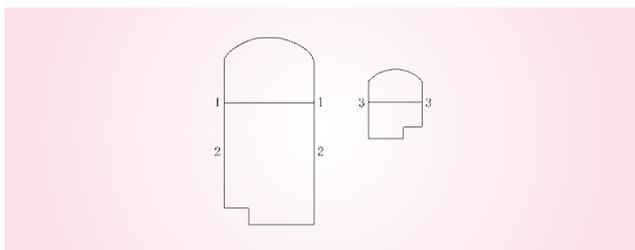


图 1 洞群截面形态及收敛测线示意

表 1 各方案支护措施

方案编号	方案 1	方案 2
支护情况	$L=10\text{ m}@2\text{ m}\times 2\text{ m}$	$L=10\text{ m}@1\text{ m}\times 1\text{ m}$

以方案 1 作为基准方案，将各评价指标计算值归一化处理后得到分项属性，然后相加得到总评分，根据总评分进行支护方案决策。两种方案的计算及评分结果见表 2。

图 2 为支护方案 2 在整体破坏临界状态下的破损区示意图。由图 2 可知，当围岩破损区或最大剪应变贯通时，标志洞群进入临近整体破坏状态，此时施加支护方案 2 的洞群安全裕度为 1.47，对比支护方案 1 的洞群安全裕度 1.43，说明采用不同密度的支护措施，对整个洞群的安全裕度改善程度也是不同的。本文中采用基于强度折减法的整体安全系数作为支护效果的评价指标是可行的，可以定量描述支护措施对洞室整体稳定性的改善程度。

表 2 计算得到的各方案各指标值及评分值

方案编号	整体安全系数 SF	分项属性	洞壁变形最大值 u_{max}/mm	分项属性	关键部位相对收敛率 K						总属性 P
					收敛测线 1/%		收敛测线 2/%		收敛测线 3/%		
					分项属性	分项属性	分项属性	分项属性	分项属性	分项属性	
1	1.43	0.40	32.7	0.30	0.265	0.10	0.285	0.10	0.291	0.10	1
2	1.47	0.58	31.3	0.41	0.253	0.17	0.272	0.17	0.128	0.20	1.53

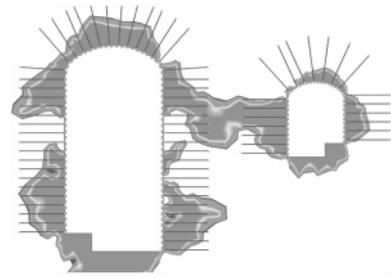


图 2 方案 2 临界失稳状态时破损区

2 模型建立

2.1 地质概化模型的建立

大渡河流域某水电站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。主厂房开挖跨度为 30.80 m，主变室开挖跨度为 18.80 m。尾水调压室净跨度为 20.50~24.00 m。场址工程区地质条件复杂，区域地应力水平较高，发育有断层、岩脉等不利地质结构。

在地下厂房前期研究资料的基础上，选取典型地质断面 2 号机组剖面进行开挖与支护的数值模拟计算，地质概化模型及网格划分见图 3。地应力系数取值：垂直地下厂房轴线方向（侧压）取 0.65，地下厂房轴线方向取 1.49。

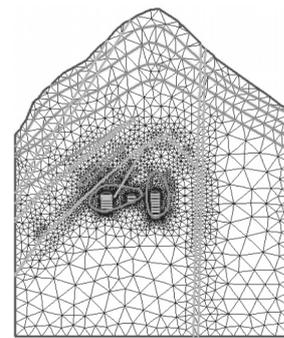


图 3 2 号机组剖面地质概化模型及网格划分

虽然针对不同围岩类别制定了相应的支护方案，但在实际运用中，仍需要根据具体地质情况，对既有方案进行一定优化，以达到安全、经济的目的。

2.2 数值计算模型的建立

采用 Phase2 软件进行本研究，计算按平面应变问题考虑，采用 M-C 屈服准则和关联流动法则。对节理使用 Goodman 单元^[9]模拟，采用 M-C 滑动准则^[6]。

岩体力学参数见表3。节理力学参数见表4。

表3 厂房洞群围岩岩体力学参数

围岩类别	弹性模量/GPa	泊松比	容重/ $MN \cdot m^{-3}$	粘聚力/MPa	内摩擦角/(°)	膨胀角/(°)	抗拉强度/MPa
Ⅰ类	21.8	0.25	2.65	1.65	51.5	51.5	6.0
Ⅱ类	14.2	0.28	2.62	1.5	50	50	5.0
Ⅲ类	6.0	0.30	2.62	1.15	45	45	4.0
Ⅳ类	2.24	0.35	2.58	0.6	31	31	2.0
Ⅴ类	0.7	0.37	2.45	0.1	22	22	0

表4 不连续面力学参数取值

内摩擦角/(°)	粘聚力/MPa	抗拉强度/MPa	切向刚度/ $MPa \cdot m^{-1}$	法向刚度/ $MPa \cdot m^{-1}$
33	0.2	0.03	3 000	8 000

由于2号机组剖面主变室和尾调室洞室附近地质条件较为复杂，表5为依据复杂的围岩地质条件制定的多种支护方案。其中，主厂房均采用Ⅰ类围岩支护标准，主厂房与主变室之间岩墙布置3排对穿锚索。

表5 优化方案设计

方案编号	主洞室		
	主变室	岩墙间对穿锚索	尾调室
A1	Ⅰ类围岩支护标准	2排	Ⅰ类围岩支护标准
A2	Ⅰ类围岩支护标准	3排	Ⅰ类围岩支护标准
B1	Ⅰ类围岩支护标准	2排	Ⅰ类围岩支护标准
B2	Ⅰ类围岩支护标准	3排	Ⅰ类围岩支护标准
C1	Ⅰ类围岩支护标准	2排	Ⅰ类围岩支护标准
C2 (初始支护方案)	Ⅰ类围岩支护标准	3排	Ⅰ类围岩支护标准
D1	Ⅰ类围岩支护标准	2排	Ⅰ类围岩支护标准
D2	Ⅰ类围岩支护标准	3排	Ⅰ类围岩支护标准

3 计算结果及分析

不同支护方案的综合评分结果见表6。以C2(初始支护方案)为基准，根据总属性评分，可以非常直观地看出A2和B2支护方案对改善洞群稳定性极为有利。进一步考虑到方案B2相对其他可用方案，锚杆与锚索材料用量较少，具备经济性优势，最终确定对2号机组剖面洞室围岩采用该方案进行支护。

图4~5为无支护及采用B2支护方案时，洞群开挖过程洞周变形曲线。从图4~5可以看出，基于本文优化方法得到的B2支护方案，不但有利于提高洞群的整体安全性，对于抑制洞周变形方面效果

也较为显著，有效地减少了顶拱及上、下游边墙的位移量，满足正常使用要求。

表6 计算得到的各方案指标归一化评分值

方案编号	各评价指标归一化评分值			总评分
	u_{max} (权值0.3)	K (权值0.3)	SF (权值0.4)	
A1	0.295	0.281	0.420	0.996
A2	0.301	0.291	0.455	1.046
B1	0.289	0.276	0.400	0.965
B2	0.299	0.285	0.420	1.004
C1	0.293	0.249	0.353	0.896
C2	0.300	0.300	0.400	1.000
D1	0.289	0.286	0.320	0.895
D2	0.299	0.293	0.378	0.970

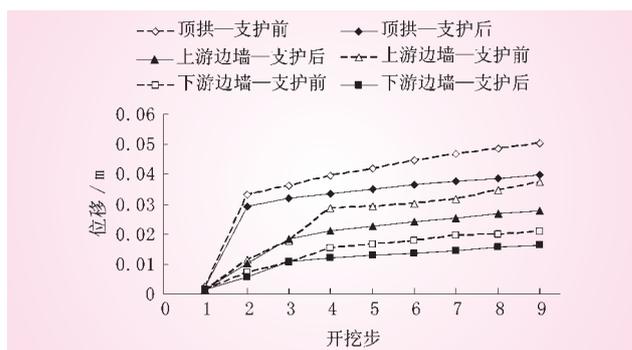


图4 主变室支护前、后洞周开挖变形过程

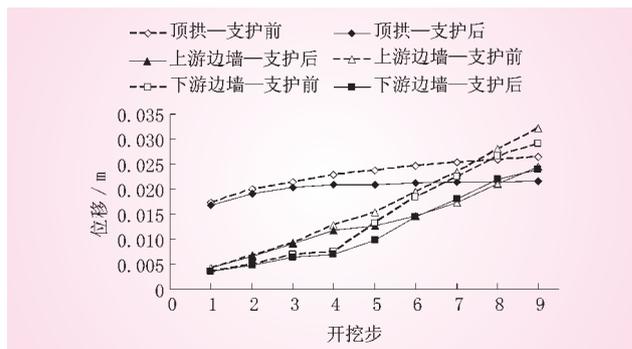


图5 尾调室支护前、后洞周开挖变形过程

图6~7为无支护及采用B2支护方案时洞群开挖完成后破损区示意图。从图6~7可以看出，无支护时围岩破损面积较大，如尾调室上、下游边墙破损区范围最大分别可达21、22m。采取B2支护方案后，破损区范围大部分控制在10m以下，围岩受力状态较为理想，说明不同密度的锚杆与锚索组成的合理支护体系发挥了较好的效果。

4 结语

支护优化研究中，不同的优化指标会得到不同的优化结果，本文针对不同支护方案的若干评价指标，通过归一化处理 and 综合评分方法，为地下洞群的支护优化提出了更加量化的综合(下转第26页)

参考文献:

[1] SDJ20—78 水工钢筋混凝土结构设计规范[S].
 [2] SL191—2008 水工混凝土结构设计规范[S].
 [3] DL/T5057—2009 水工混凝土结构设计规范[S].
 [4] GB 50010—2002 混凝土结构设计规范[S].
 [5] JTJ 267—98 港口工程混凝土结构设计规范[S].
 [6] JTG D62—2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
 [7] ACI 318—08 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary[S].
 [8] CEN Standard. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1: General rules and rules for buildings[S].
 [9] TB 10002.3—2005/J462—2005 铁路桥涵钢筋混凝土和预应力混

凝土结构设计规范[S].
 [10] AASHTO LRFD—2005 Bridge Design Specifications (Third Edition) [S].
 [11] BS8100 British Standard 8100[S].
 [12] CSA A23.3—04 Design of concrete structures[S].
 [13] AS3600—2001 Concrete Structures[S].
 [14] CII52—101—2003 钢筋混凝土结构 (俄罗斯标准)[S].
 [15] 李平先, 韩菊红, 丁自强. 水工钢筋混凝土受弯构件受剪承载力的计算[J]. 工业建筑, 2003, 33(9): 69-71.
 [16] 白生翔, 黄成若. 钢筋混凝土构件试验数据集[C]. 北京: 中国建筑科学研究院, 1985: 35-59.

(责任编辑 常 青)

(上接第 10 页)

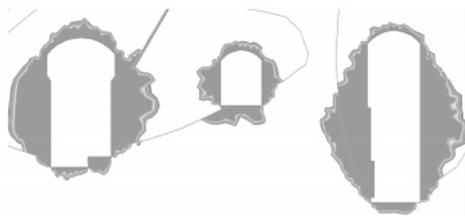


图6 无支护时洞周破损区示意

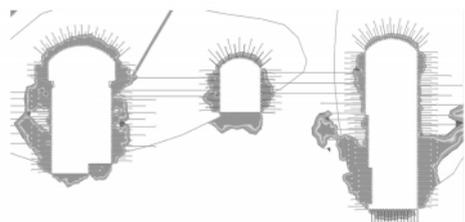


图7 支护后洞周破损区示意

指标。该方法既考虑大型地下洞室群的整体稳定性改善程度,也兼顾了局部变形特征,所得到的优化方案更具科学合理性。针对大渡河流域某水电站地

下厂房洞室群的支护优化设计研究表明,该方法方便实用,得到的优化方案支护效果较为理想,具有一定的工程应用价值。

参考文献:

[1] 杨为民, 李术才, 陈卫忠, 等. 琅琊山抽水蓄能电站地下厂房洞室开挖与支护数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增2): 4966-4970.
 [2] 苏国韶, 冯夏庭, 江权, 等. 高地应力下大型地下洞室群开挖顺序与支护参数组合优化的智能方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 2800-2808.
 [3] 江权, 冯夏庭, 向天兵. 基于强度折减原理的地下洞室群整体安全系数计算方法探讨[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2483-2488.
 [4] 张黎明, 郑颖人, 王在泉, 等. 有限元强度折减法在公路隧道中的应用探讨[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 97-102.
 [5] 周维垣, 杨强. 岩石力学数值计算方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
 [6] Sandip Shah. A Study of the Behaviour of Jointed Rock Masses [D]. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy, Graduate Dept. of Civil Engineering, University of Toronto, 1992.

(责任编辑 杨 健)

(上接第 22 页)坝体渗漏量突变骤增最为明显的坝段。

5 结 语

岩滩大坝坝体渗漏量 2008 年初突变骤增,是因遭遇罕见冰冻低温而出现的异常变化现象,其影响机理为:低气温首先促使库水温度下降,进而使坝体混凝土温度下降,体积收缩,混凝土表层和内部微细裂隙及坝段之间横缝张开,致使坝体渗漏量突变骤增。岩滩大坝溢流坝段主要为碾压混凝土,由于施工过程中遗留下一些缺陷,部分碾压混凝土密实度较差,导致溢流坝段成为坝体渗漏量突变骤增较为严重的部位。该坝于 20 世纪 80 年代末 90 年代

初建设,是我国较早采用碾压混凝土筑坝的工程,在低温荷载作用下,其碾压混凝土质量缺陷对低气温引起坝体渗漏量变化的敏感反应,对于目前在建和拟建的类似工程,无疑具有重要的参考价值。

参考文献:

[1] 大唐岩滩水力发电有限责任公司. 大唐岩滩水电站大坝运行报告[R]. 2009.
 [2] 河海大学, 大唐岩滩水力发电有限责任公司. 岩滩水电站大坝监测资料分析报告[R]. 2009.
 [3] 水电水利规划设计总院. 岩滩水电站竣工验收枢纽工程质量鉴定与大坝安全鉴定报告[R]. 1996.

(责任编辑 常 青)