

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2008.06.013

地下洞室群开挖顺序优化设计

杨海霞¹, 刘志鹏², 卓家寿¹

(1.河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098;2.宁波市北仑区水利局,浙江 宁波 315800)

摘要:遵循动态规划原理建立了地下洞室群开挖顺序动态规划模型,提出了评价不同开挖排序方案优劣的最小能量偏差准则,并以能量偏差为目标函数.实例计算表明,开挖顺序对围岩稳定的影响是明显的,对开挖顺序的优化要给予重视.提出的地下洞室群开挖顺序动态规划模型合理,计算工作量较少,以形状改变比能偏差为目标函数的优化方案中最大洞周位移比位移类目标函数的最大洞周位移略大,但从应力状态、塑性区面积和能量的角度考虑,前者的优化方案更佳.因此,以形状改变比能偏差为目标函数更合理.

关键词:优化设计;地下洞室;开挖顺序;动态规划

中图分类号: TU712⁺.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1980(2008)06-0786-04

地下洞室群的开挖都不是一次全断面完成的.由于围岩多为非线性介质,因此开挖后围岩的最终应力和位移状态与开挖过程相关.对于一个大型工程,如果将所有可能的施工顺序排出,常常多达上百种,因此,只能根据经验列出数种开挖方案^[1],再作比选.1992年,朱维申等^[2]提出了“动态施工力学”,并运用动态规划原理对洞群的开挖顺序进行优化设计.1996年,李术才等^[3]以围岩破损区面积为目标函数,对小浪底地下洞室群施工顺序作了优化设计.吴波等^[4]以地表沉降量为目标函数,研究了地铁隧洞群开挖顺序动态优化.卢山^[5]以改进模拟退火算法为优化方法,研究了地下洞室的开挖顺序优化问题.文献[2-3,6]开创性地建立了地下洞室开挖顺序动态规划模型,但是在动态分析过程中,每次只作2个子策略的比较.这样处理使问题变得简单,中间数据文件的传递也易于实现,却没有严格遵循动态规划最优化原理:最优策略的子策略构成最优子策略,因此可能会略去最优策略^[7].文献[5]提出的方法,对地下洞室群开挖中有时出现的施工约束条件考虑不够,例如同一个洞室中开挖的顺序性.

本文严格遵循动态规划原理,建立了地下洞室群开挖顺序动态规划模型,并提出了评价不同开挖排序方案优劣的最小能量偏差准则.

1 地下洞室群开挖顺序动态规划模型

虽然地下洞室群开挖顺序的优化问题属于多阶段决策过程的最优化问题,但它与目前动态规划已成功解决的最短路线、资源分配等问题有显著的区别.要求解这样的新问题,其关键是研究一个适合于地下洞室群开挖顺序的动态规划模型.

对一个问题建立动态规划数学模型的步骤是:(a)确定阶段及阶段状态变量;(b)确定决策变量、权函数以及目标函数;(c)建立状态转移方程;(d)建立递归方程.

为了方便理解,以下结合一个实例来说明地下洞室群开挖顺序优化问题的建模方法.图1为某抽水蓄能电站地下厂房洞室群的开挖分块示意图,左侧主厂房分6步开挖,右侧主变电室分4步开挖.为了使问题简化和便于描述,对地下洞室的开挖还作了如下假设:(a)从主厂房的顶部开始开挖;(b)每个洞室的开挖顺序为自上而下;(c)将最下面的尾水洞与主厂房第6级一起开挖,中间的母线洞与主变电室第4级一起开挖.这样的假定不影响本文建模方法的一般性.

1.1 阶段

阶段是对所规划问题整个过程的自然划分,阶段的数目用 N 表示.本文将洞室开挖块的某一个或某几

个组合看作一个阶段.图 1 所示实例中共有 10 个阶段.

1.2 状态变量与决策变量

描述状态的变量称为状态变量,变量允许取值的范围称为允许状态集合,用 s_k 表示第 k 阶段的状态变量, S_k 表示其允许状态集合.决策就是在给定某阶段状态后,从该状态演变到下一阶段状态所作的抉择.描述决策的变量称为决策变量.显然,第 k 阶段的决策变量 x_k 的取值集(称为允许决策变量集合)与 s_k 有关,可记为 $Z_k(s_k)$.决策变量序列($x_1, x_2, \dots, x_N$)的一组值称为一个策略,而决策变量子序列($x_k, x_{k+1}, \dots, x_N$)的一组值称为一个子策略.

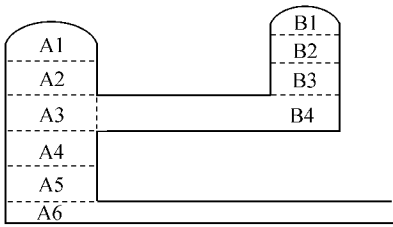


图 1 地下厂房洞室群的开挖分块
Fig.1 Excavation stages of underground cavity groups

地下洞室群开挖顺序优化问题与一般最短路径类动态规划问题的区别在于：
a. 一般动态规划问题各个阶段的决策变量取值集是条件中给定的,可以事先确定;而地下洞室群开挖顺序优化题中的决策变量取值集是根据动态规划进程而定的,不仅与上阶段的开挖块有关,还与此前的开挖路径有关.

b. 权函数 $w_k(s_k, x_k)$ 是当决策变量 x_k 的值确定后,该阶段取得的效益指标.显然,地下洞室群开挖顺序优化问题中应取该阶段围岩力学效应的负增值为目标函数.而在地下洞室群开挖顺序优化问题中,这样的 $w_k(s_k, x_k)$ 是事先无法确定的,由于非线性特点,它与以前的开挖路径(应力路径)有关.

这 2 个特性使得地下洞室群开挖顺序的动态规划变得复杂,决定了某一阶段的状态变量不能简单地取上一阶段的开挖块(决策变量),也决定了求解这个动态规划问题适合用顺序解法.

根据地下洞室群开挖顺序优化问题的特性,决策变量 x_k 取为 k 阶段确定的下一个开挖块,而将状态定义为至 k 阶段终点,包括整个开挖路径的开挖现状.状态变量 s_k 为从 A1 至本阶段终点的子策略(决策变量序列),如(A1, B1, A2)为第 3 阶段的一个状态变量.状态变量集合 S_k 为从 A1 至 k 阶段终点的决策变量不完全相同的子策略集合,如第 3 阶段的 S_3 为 I(A1, A2, A3), II(A1, A2, B1), III(A1, B1, A2)和 IV(A1, B1, B2)的集合.由于 4 个子策略包含的决策变量(开挖块)不同,所以不能对这 4 个子策略进行目标函数的比较,只能对 II 和 III 2 个子策略进行比较,并将好的子策略保留,不好的子策略删除.

1.3 目标函数与权函数

到 k 阶段为止,已获得的目标函数值用 $f_k(s_k)$ 表示,而由于 k 阶段开挖引起的目标函数的增量即为权函数 $w_k(s_k, x_k)$.

寻求最佳开挖方式是为了获得围岩最大的稳定性.因此,以围岩的稳定状态函数为评价方案优劣的准则函数,即目标函数.由于洞室围岩稳定判别本身的复杂性,很难得出一个公认的稳定系数来进行稳定性判别,只有从静力、变形和能量各方面寻求围岩稳定判别的准则^[8].从静力评估角度,对于没有明显滑动面的情形,可以依据塑性区的大小来决定方案的优劣.从变形评估角度,可以取洞室周边的某种特征位移为评估依据,如洞周最大位移、洞周位移平均值、洞周控制点间的相对位移偏差值等^[6,9].从能量评估角度,基于结构优化设计中的能量准则法^[10],提出最小能量偏差准则和最小形状改变比能偏差准则^[7],简述如下:

设围岩中第 i 单元的应变能为 u_i ,能量库容为 $\bar{u}$ (能量库容指围岩单元能够吸收的最大应变能,即当整个单元中应力都达到它的应力极限时,单元中储存的应变能).对于不同的开挖方案,使式

$$\sum_{i=1}^{n_e} \left(\frac{u_i}{\bar{u}} - 1 \right)$$

(1)

取值最小的为最优方案,称此准则为最小能量偏差准则.该准则体现的是能量分布均匀.因此,也可以将 $\bar{u}$ 改为围岩应变能的平均值.

基于第四强度理论,即形状改变比能理论^[11],也可以将式(1)的应变能改写成形状改变比能:

$$\sum_{i=1}^{n_e} \left(\frac{u_{di}}{\bar{u}_{di}} - 1 \right)$$

(2)

式中: u_{di} ——形状改变比能, $\bar{u}_{di}$ ——材料 u_{di} 的极限值.也可以将其取为围岩各单元形状改变比能的平均值.称此为最小形状改变比能偏差准则.

1.4 状态转移方程和递归方程

状态转移方程为

$$s_{k-1} = s_k - x_k \quad (k = 1, 2, \dots, N)$$

(3)

递归方程为

$$\begin{cases} f(s_0) = 0 \\ f(s_k) = \min_{x_k \in Z_k(s_k)} \{w_k(s_k, x_k) + f(s_{k-1})\} \end{cases} \quad (k = 1, 2, \dots, N)$$

(4)

至此,已经建立起地下洞室开挖顺序优化问题的动态规划模型.

2 地下洞室群开挖顺序动态规划法的程序设计

开挖问题有限元计算中,从第2级起,每1次开挖后的应力分析都需要用到上一级的应力、位移等结果.因此编写地下洞室群开挖顺序动态规划法程序的主要难点是:首先,开挖顺序是未知的,结构分析与排序工作要交替进行;某一阶段的初始状态(前几级开挖顺序)需要根据上一阶段的目标函数分析才能确定,而本阶段某状态的决策集(下一级可能开挖块)在该状态确定后才能确定.其次,要计算不定组数的方案,并需要在计算过程中判别哪些组的结果需要保留,哪些组的结果可以被覆盖.

例如前述实例中第3阶段,根据排序子程序判别出需要计算4个子策略的目标函数,它们是I(A1,A2,A3),II(A1,A2,B1),III(A1,B1,A2),IV(A1,B1,B2).假设计算方案II(A1,A2,B1)时,需要判别出对应的上一阶段的子策略是(A1,A2),然后将上一阶段的子策略(A1,A2)的应力等结果作为初始状态文件输入,将B1块的开挖信息文件也作输入文件.此外,还要根据所包含的决策变量完全相同作以下判断:将子策略II与III的目标函数作比较,将(II,III)中目标函数小的子策略和本阶段没作比较的子策略(I,IV)的结果文件保留,供下一阶段计算时作初始状态文件输入,而(II,III)中目标函数大的子策略的结果文件可以被覆盖.

根据上述建模公式,用Fortran90语言编写了地下洞室群开挖动态规划程序,实现了对任意分块洞室群最优开挖顺序的自动排定.

3 实例计算

以图1所示地下厂房洞室群为例.主厂房高51.5m,宽23.5m,主变室高32.5m,宽18m,母线洞长45m,高9.35m,尾水洞长63m,高5.8m.该厂房围岩以III类为主,将厂房附近的岩体分为4种,它们的变形模量分别为5750MPa、4100MPa、5000MPa和6250MPa.厂房区最大垂直压应力为12.97MPa,最大水平压应力为13.15MPa,最大侧压系数为1.01.

3.1 计算结果

对目标函数分别取洞周最大位移、洞周特征点位移平均值、洞周位移偏差、形状改变比能偏差进行洞室群开挖顺序的优化计算.目标函数为洞周最大位移和洞周特征点位移平均值时的最优排序方案一致,将该方案称为方案一;将目标函数为洞周位移偏差时的最优方案称为方案二;将目标函数为形状改变比能偏差时的最优方案称为方案三.表1列出了3个最优排序方案洞周力学效应的特征值.

表1 不同目标函数下最优排序方案的特征值

Table 1 Characteristic values of optimum schemes with different objective functions

最优方案	最大垂直位移/cm	最大水平位移/cm	塑性单元数	主厂房顶拱塑性单元数	主变室顶拱塑性单元数	主厂房环向应力/MPa	主变室环向应力/MPa
方案一	8.37	3.81	60	0	10	13.5	9.4
方案二	8.62	3.96	47	3	4	14.6	8.2
方案三	8.46	3.93	47	0	2	12.7	7.8

方案一开挖顺序:A1—A2—A3—A4—A5—A6—B1—B2—B3—B4;方案二开挖顺序:A1—B1—B2—B3—A2—A3—A4—B4—A5—A6;方案三开挖顺序:A1—A2—A3—A4—B1—B2—B3—B4—A5—A6.

3.2 成果分析与结论

- a. 从表1知,方案一是以位移为目标函数,所以该方案的最大位移比其他2个方案要小,但差别不大.
- b. 方案一进入塑性状态的单元最多,塑性区面积最大,在主变室顶拱与底部、母线洞顶部与底部及尾水洞顶部与底部有连成片的塑性区.方案二与方案三的塑性区面积接近,但是部位不同.它们在主厂房的底部、母线洞与尾水洞的顶部均有成片的塑性区,其余的塑性区,方案三主要出现在母线洞底部,但方案二出现在

主厂房和主变室的顶拱部,而且连成小片.从塑性区的大小及分布来看,方案三最优.

c. 从表 1 知,方案一和方案二中,主厂房和主变室的最大环向应力均明显大于方案三的值.从洞周应力方面看,方案三最优.

d. 由于方案三是目标函数为形状改变比能偏差时的最优方案,因此,它也是 3 个方案中能量偏差最小的方案.

综上所述,从应力、位移和能量 3 个方面综合考虑,方案三最优.从理论上分析,这是由于以能量为目标的函数兼顾了应力和变形 2 个因素所致.这个结论也表明本文提出的以形状改变比能为目标函数来评价方案优劣的方法是合理和适用的.

对于这样一个 10 级开挖的 2 洞室,所有可能的施工方案约有 168 种.而用本文提出的动态规划方法只须结构分析 50 次(相当于 5 个方案)就可以找到最优的开挖方案,计算时间大大减少.

4 结 语

a. 开挖顺序对围岩稳定的影响是明显的,在设计中,对开挖顺序的优化要给予重视.

b. 本文提出的地下洞室群开挖顺序动态规划模型合理,计算工作较少.

c. 以形状改变比能偏差为目标函数的优化结果比位移类目标函数的优化结果的最大洞周位移略大,但从应力状态、塑性区面积和能量的角度考虑,前者更佳.因此,以形状改变比能偏差最小来评价不同排序方案更合理,并且 2 种最小能量偏差准则可以用于更一般问题的洞室不同方案的优劣判别.

参考文献:

- [1] 邓昌铁,魏庭光.天荒坪抽水蓄能电站地下洞室群开挖顺序[J].河海大学学报:自然科学版,1999,27(5):68-72.
- [2] 朱维申,王平.动态规划原理在洞室群施工力学中的应用[J].岩石力学与工程学报,1992,11(4):323-331.
- [3] 李术才,朱维申,陈卫忠.小浪底地下洞室群施工顺序优化分析[J].煤炭学报,1996,21(4):393-398.
- [4] 吴波,高波,漆泰岳,等.城市地铁区间隧洞群开挖顺序优化分析[J].中国铁道科学,2003,24(5):23-28.
- [5] 卢山.地下工程位移反分析及开挖顺序优化方法研究[D].长沙:湖南大学,2006.
- [6] 朱维申,何满潮.复杂条件下围岩稳定性与岩体动态施工力学[M].北京:科学出版社,1996:292-332.
- [7] 杨海霞.地下洞室全过程优化设计建模理论与分析方法[D].南京:河海大学,2002.
- [8] 卓家寿,邵国建.溪洛渡右岸地下洞室群围岩稳定分析的研究与应用[R].南京:河海大学,1999.
- [9] 冯紫良.地下洞室形状设计优化的一个方法[J].岩土工程学报,1993,15(3):30-34.
- [10] 李炳威.结构优化设计[M].北京:人民交通出版社,1989:115-118.
- [11] 孙训方.材料力学:下册[M].北京:人民教育出版社,1979:42-62.

Optimum design of excavation sequence underground cavity groups

YANG Hai-xia¹, LIU Zhi-peng², ZHUO Jia-shou¹

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Bureau of Water Conservancy of Beilun District of Ningbo City, Ningbo 315800, China)

Abstract: Based on the dynamic programming principles, a dynamic programming model of excavation sequence for underground cavity groups was presented. The minimum strain energy deviation (objective function) criteria were proposed to choose the optimum scheme of the excavation sequence. The case studies show that the effect of excavation sequence on the stability of the surrounding rocks is obvious, and much attention should be paid to the optimum design of the excavation sequence. The present model is reasonable and easy to calculate. The maximum displacement around the cavity calculated by the deviation of shape change specific energy as the objective function is a little larger than that by the displacement as the objective function, but from the viewpoint of the stress conditions, the area and energy of plastic zones, the former is much better. Therefore, it's more reasonable to use the deviation of shape change specific energy as the objective function.

Key words: optimum design; underground cavity; excavation sequence; dynamic programming