

动态规划原理在洞室群 施工力学中的应用*

朱维中 王平

(中国科学院武汉岩土力学研究所 武汉 430071)

摘要 本文总结了近几年来国内外有关开挖顺序对围岩稳定影响的研究成果,提出了洞室群施工力学的概念,应用动态规划原理,用洞周破损区面积表示收益函数,给出了一种搜索洞室群最佳施工方案的方法,大大改进了以前的工作。最后结合广东抽水蓄能电站地下洞室进行了四种不同应力情况下的优化分析,并评价了实际的施工步骤的稳定性,得出了一些有意义的结论。

关键词: 动态规划, 洞室群, 分期分段开挖, 优化分析。

1 前言

在大型地下工程(尤其是大型地下洞室群)的施工过程中,不可能全断面一次成洞,而需要根据出渣运输洞的布置、施工机械的类型和岩石特性等条件,选择开挖施工方案,因而就确定了大型洞室是分层分块地开挖、逐步形成洞室设计体型的特点。在开挖时间上就有分期开挖过程。在分期开挖过程中,每一个施工分期对应于一种施工短期洞型,不同的开挖顺序,就意味着对围岩的一种不同的暂时加载方式。在施工期间不断变化着的洞型和加载方式,不仅影响施工期内围岩的应力、破损区和洞周位移,而且影响洞体成型后的应力分布、破损区大小以及洞周位移状况。由于开挖是造成围岩应力重分布的基本原因,因此,地下洞室的开挖方式已引起人们的广泛注意。

为了维护大型地下洞室群的稳定,有许多可供采用的工程措施。鉴于洞室群开挖存在分期分块的特点,在各项措施中,以采取合理的开挖顺序和适时有效的支护方案最为经济有效,这便是洞室群施工力学的基本思想。在近几年的有关文献^[1-6]中,可以找到这种思想的萌芽,而文献[4]是较早对洞室群施工力学进行细致全面分析的。

近几年的主要研究成果反映在以下几个方面:

文献[1]假定岩体能无限承压和无限抗剪,但不抗拉。承压时符合线弹性力学模式,受拉时则采用各向无拉力学模式。通过有限元计算分析,得出结论为:岩体抗反复扰动的能

力差,因此,不太大的洞室最好采用全断面开挖;即使是大型洞室,在施工条件许可的情况下,也应尽量减少开挖次数;分期开挖时,最好按某种规律渐次安排开挖顺序,使岩体应力按一定规律变动,不宜在洞室断面内多次跳格开挖;初应力场对开挖效果的影响较大,而分期开挖则是以前期开挖的应力场作为后期开挖的初应力,因此,早期段的开挖应采用较好的开挖洞型,使晚期开挖获得较好的初应力场;不论是开挖阶段或开挖完成后,洞室附近岩体中出现高应力都是不利的;在这种情况下,可于洞室壁上适当部位开凿径向沟槽,达到既能部分地解除洞周高切向应力,使应力集中转移到较深部围岩中,又能保持岩体相对完整的目的。

文献[2]较详细地研究了东风发电厂区洞室群开挖顺序对洞室围岩应力分布的影响。研究结果认为,与一次开挖成型相比,分期开挖达到终了体型时,顶拱环向压应力将增加2.7倍,拱脚及两侧边墙环向压应力约降低1.4倍,底板环向压应力也将增加。

文献[3]分别讨论了开挖方式、地应力以及地质构造断层对围岩稳定的影响。这里仅引用地应力对洞室围岩稳定的影响的结果。通过侧压系数 k (水平与垂直地应力比值)来表示岩体地应力的特征。在洞室施工分期开挖中,应尽量使开挖洞型与地应力特征匹配。例如当 $k < 1.0$ 时,将地下厂房拱顶部分划分为几个高跨比大于1.0的小型开挖断面,不仅有利于顶拱围岩稳定,也有利于支护施工。

文献[4]认为:在非线形分析中,如不采用分部开挖而按一次成洞处理,则可能过分夸大破损区及洞周位移值,因此是不可取的。由于应力历史起作用,所以在洞群分析中,为保证关键部位的安全,应进行多方案的优化分析比较。在优化分析中则发现,为使最终破损区较小,应尽量避免同一开挖步序中各洞间互相影响,即将各洞的开挖步序从时间及空间上尽量错开、远离。在高应力区的洞群开挖中,为减少围岩破损,每次开挖量不宜过多,以减少每次开挖形成的超应力区,且应及时进行锚喷支护,以取得更好的效果。

不论从什么工程角度、什么工程背景出发,以上文献都反映了这样一个基本观点:即大型地下洞室群施工的分期分块是客观存在的现实,这种分期分块的不同组合,锚喷支护的施作时机,确实对终了洞形的稳定状况有举足轻重的影响;按照某种给定的施工步骤,能够达到最佳的终结状况,合理地选择这种施工步骤,就可以使施工最经济、有效。这就是洞室群施工力学的基本思想。这对处于复杂地质条件下的洞室尤为重要。

以往的研究只是定性地指明了施工顺序对围岩稳定的影响,是从所列举的极有限的若干施工方案中找出一种较优的方案,该方案并不一定是全局中的最优。本文结合动态规划原理,给出了一种搜索洞室群最佳施工方案的方法,并结合一个典型工程做了优化分析。

2 动态规划原理⁽⁷⁾

动态规划(dynamic programming)是R·E·Bellman在1957年创立的。动态规划是解决最佳化问题的一种特殊途径。所谓最佳化,通常指的就是从备选方案集合中,找出某问题的最好解。

2.1 最佳化原理

一个最佳策略具有这样的性质: 不管初状态或初策略如何, 相对于初策略所产生的状态来说, 最后的策略必须构成最佳策略。

动态规划主要有下列优点:

1. 应用动态规划, 可以把一个 n 维最佳化问题, 变化为 n 个可以逐个求解的一维最佳化问题, 这是经典的极值方法所做不到的。

2. 它几乎超过了所有现存的计算, 特别是经典的最佳化方法; 它能确定绝对 (全局) 极大或极小, 而不是相对 (局部) 的极值, 因此我们不再需要关心伤脑筋的局部极大和极小问题。动态规划不是一种“算法”, 而是构造解决某些问题的一种途径, 以便能采用某种方法。

应用动态规划的问题通常是用下列术语表达的: 一个物理的操作系统或概念化系统, 可以视为是按一系列顺序的级而向前发展的。在每一级, 系统可用一相对来说较小的参数组来描述或表征, 这些参数称为状态变量或状态向量 (或简称状态)。在每一级, 不管系统处于什么状态, 都要做出一次或多次决策。这些决策可依赖于级或依赖于状态, 或同时依赖于二者。可以认为, 系统过去的历史, 即怎样达到目前的级或状态, 是不重要的。换句话说, 决策往往取决于当前的级或状态。当做了一次决策后, 会得到一个收益或报酬, 同时系统经历了一次变换或转移, 到达下一级, 收益是由一输入状态的已知单值函数所决定的。与此类似, 变换后的状态是由作用于当前状态的已知单值函数所决定的。所谓级发展的过程的总目标, 是使状态和决策变量的某个函数极大或极小化。涉及动态规划问题的关键元素是级、状态、决策、变换和收益。

2.2 级

为了能表示决策的次序, 需要引进级的概念。级变量的主要作用是, 按次序编出所研究的过程的顺序划分的号码。许多不能自然地利用级加以描述的问题, 也能进行处理。例如, 在地下洞室开挖过程中, 我们将某些开挖步骤组合在一起, 成为开挖的第一级, 另一些成为第二级等等。多变量最佳化问题的一个关键性质在于, 它可将最佳化问题看作为一个多决策过程, 表述为某个按任意顺序作出的决策, 其中顺序的每一步可表示成一级, 每级的重要特征在于, 为了定义或刻划一级, 需要什么状态。

2.3 状态

状态空间是一个非空集合 Λ , 一个元素 $\lambda \in \Lambda$, 称为一个状态, 它是一个变量 (或一组变量) 的一种描述, 这个变量描述了所研究系统或过程的状况。状态空间 Λ 由系统的全部可能存在的状态变量组成。例如在地下开挖过程中, 状态变量描述了系统 (开挖) 当前的开挖步骤。状态空间 Λ 则由全部可能的开挖步骤组成。

2.4 决策

系统的状态必须包含在某给定的级上确定全部允许决策所需的全部信息。所以，对于每个状态 $\lambda \in \Lambda$ ，有一非空集合 X_λ ，称为 λ 的决策集合，一个元素 $x_\lambda(\lambda) \in X_\lambda$ 称为决策或决策变量，它表示当系统或过程处于级状态 λ 时的一种可利用的选择。决策集合 X_λ 是由系统处于 λ 状态时，全部可能作出的选择组成的，例如图 2 中，状态 P1T1T2T3 所对应的后继决策有 T4 或 P2。

2.5 收益

由于动态规划问题是最佳化问题，因之有一个目标函数可用来对某一给定的策略进行评价。总收益是级收益的某个组合（和或乘积），它是过程由一个状态到一个状态（一级到一级）移动的累积。还需指出，收益函数由一级到另一级可能是变化的，必须做到的全部工作就是对每一级的级收益给出合理的定义。在本文的洞室群优化过程中，取破损区面积表示收益函数。

3 洞室群施工优化

本文以广蓄电站作为应用背景。广蓄电站分主厂房（规模约为 20m × 45m）和主变室（规模约为 18m × 28m）。根据设计要求，主厂房与主变室分别为 6 步开挖（编号为 P1, P2, ..., P6）和 4 步开挖（编号为 T1, T2, ..., T4）。洞室相对位置和开挖分块图见图 1。

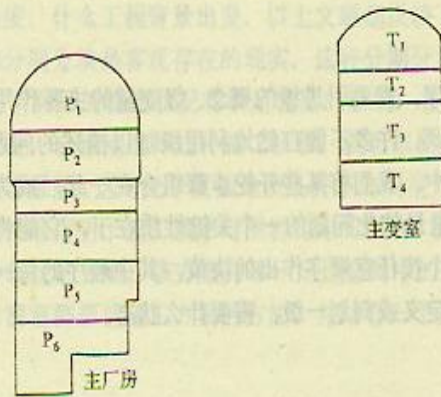


图 1 洞室相对位置与开挖分块

Fig. 1 Relative position of caverns and section division for excavation

为了简化问题, 动态规划前作如下假设:

1. 每个洞室按自上而下的顺序开挖;
2. 每一开挖步骤对应一个分块;
3. P1 为第一步开挖.

根据假设, 作者通过仔细列举, 共有 116 种组合的施工方案 (如其中的 P1T1T2T3T4P2P3P4P5P6 为一方案, 其它方案数已在图 2 中标出). 从严格意义上讲, 所谓最佳化就是从 116 种方案中找出最优方案. 要对这么多方案一一作有限元计算, 实际上是不可能的也是不必要的. 以往的研究就是从这些方案中挑出极有限的几种方案进行比较, 发现一些规律, 从而得出相对最优方案. 这是很粗糙的也是不严格的. 本文采用动态规划原理, 可以从上述众多的方案中找出最优方案. 由于有上述三个假定, 故从图 4 的搜索优化过程可以看出, 对于每一种状态, 其后继的决策方案个数就是洞室个数, 而在优化过程中又必须涉及每一开挖步骤, 因此所需最多算题数 n 为 $n = E_0 N_0$ (E_0 为总开挖步骤, N_0 为洞室群中的洞室个数). 对于本例 $n = 10 \times 2 = 20$, 即最多只需做 20 次有限元计算便可得出最佳施工方案. 在本例图 4 中可以看出, 做 17 次计算可以得出的最佳方案为带箭头的开挖路径. 将 116 种方案的比较减少为 17 种分步开挖的比较, 既大大节省了计算量, 又能找出最佳方案. 图 2 为部分开挖步骤组合的示意图. 岩体取为均匀弹塑性介质, 其力学参数见表 1. 地应力的取值为 $\sigma_x = -9.43\text{MPa}$, $\sigma_y = -7.34\text{MPa}$ 和 $\tau_{xy} = -1.24\text{MPa}$ (以拉应力为正).

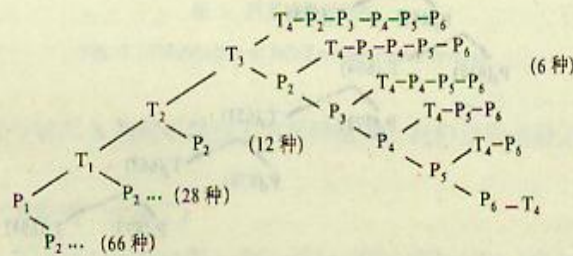


图 2 部分开挖步骤组合

Fig. 2 A part of combinations of excavation steps

表 1 岩体的力学参数

Tab. 1 Mechanical parameters of the rockmass

参数	$E(\text{GPa})$	μ	$c(\text{MPa})$	$\varphi(^{\circ})$	$R_f(\text{MPa})$
值	35	0.22	1.30	50.20	5.0

为了探讨地应力对洞室群施工步骤选择的影响, 选择了 4 种地应力场 (主应力大小不变, 只变换 σ_1 与水平向夹角 α , α 从水平向反时针量度为正), 即: A ($\alpha = 25.2^{\circ}$), B ($\alpha = 0^{\circ}$), C ($\alpha = 90^{\circ}$) 和 D ($\alpha = -25.2^{\circ}$), 如图 3.

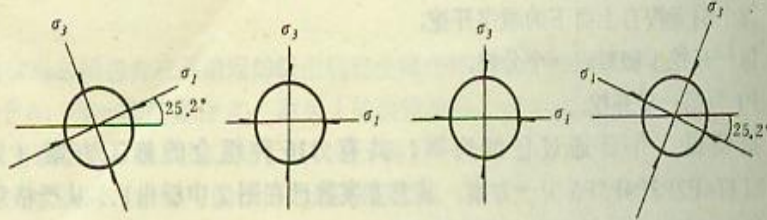


图 3 4种不同的地应力场

Fig. 3 4 different cases of geostress field

动态规划中的收益函数用破损区面积 (单位: m^2) 表示. 图 4 是 A 种地应力下的优化过程 (括号内数值为收益函数值, 即破损区面积, m^2). 图 5 (a, b, c, d) 分别是相应的破损区. 表 2 是 4 种地应力情形的计算结果比较.

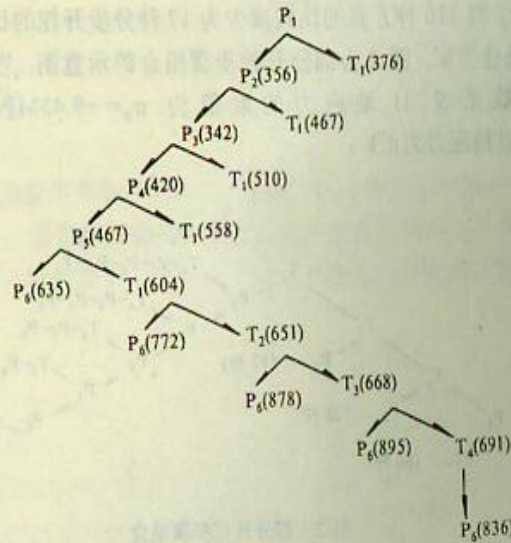


图 4 优化过程

Fig. 4 Process of optimization

表 2 最优化方案比较

Tab. 2 Comparison among optimal schemes

地应力情况	A	B	C	D
最优方案	P1...P5T1...T4P6	P1...P5T1...T4P6	P1P2T1T2P3T3T4P5P6	P1...P5T1...T4P6
破损区面积(m^2)	836	1119	1370	1282
边墙最大水平相对位移(cm)	1.24	1.46	0.87	1.44

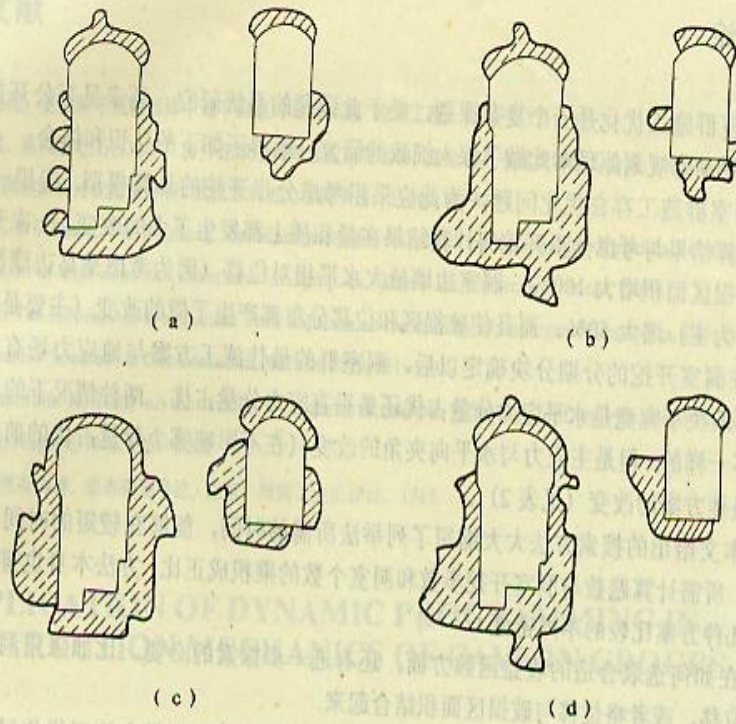


图 5 洞室破坏区分布

Fig. 5 Distribution of failed zones around caverns

为了探讨地应力场为 A 型时不同施工方案的结果, 我们随意选择了如下几种方案进行对比:

- 方案 1: PT (全断面一次施工)
- 方案 2: P1—P2—P3—P4—P5—P6—T1—T2—T3—T4 (完全顺序施工)
- 方案 3: P1—T1—P2—T2—P3—T3—P4—T4—P5—P6 (间隔施工)
- 方案 4: P1—P2—T1—P3—P4—T2—P5—P6—T3—T4 (实际施工)
- 方案 5: P1—P2—P3—P4—P5—T1—T2—T3—T4—P6 (最优施工)

表 3 是 5 种方案破坏区面积与洞周边墙最大相对位移的比较.

表 3 施工方案比较

Tab. 3 Comparison among construction schemes

方案	1	2	3	4	5
破坏区面积(m ²)	1730	859	928	938	836
边墙最大水平相对位移(cm)	1.90	1.21	1.36	1.23	1.24

4 结论

洞室群施工优化是一个复杂课题,关于此课题的系统研究,还未见有公开报导。本文首次采用动态规划原理对此做了深入细致的研究,取得了如下的认识和体会:

4.1 洞室群施工存在优化问题,为此应采用考虑分步开挖的计算模型。应用一次开挖成型的计算结果与考虑分步开挖的计算结果在量和质上都发生了大的改变。一次开挖成型不仅使破损区面积增大 100%,洞室边墙最大水平相对位移(因为考虑是高边墙洞室,以水平应力为主)增大 50%,而且使破损区和位移分布都产生了质的改变(主要是部位)。

4.2 在洞室开挖的分期分块确定以后,洞室群的最佳施工方案与地应力场有关。这种相关主要取决于究竟是水平应力分量占优还是垂直应力分量占优,两种情况下的最佳施工方案是不一样的。但是主应力与水平向夹角的变化(在不影响哪个分量占优的前提下)并不导致最佳方案的改变(见表 2)。

4.3 本文给出的搜索方法大大缩短了列举法所需的时间,能够在较短的时间内找出最优方案,所需计算题数与洞室开挖步数和洞室个数的乘积成正比。方法本身也排除了常用的通过几种方案比较的不严密性。

4.4 在如何选取合适的收益函数方面,还有进一步探索的必要,比如采用洞室周边主要收敛位移,或者将位移与破损区面积结合起来。

4.5 动态规划前曾给出三个假设前提,主要是为了方便。如果在施工优化过程中进一步考虑分期分块的优化问题,也将是很有意义的。

4.6 本文只考虑了地应力场这个影响因素,在有断层存在的情况下,还需针对裂隙发育明显的岩体做进一步的探索。

4.7 本文给出的是平面问题的计算结果,适用于做定性决策,因为实际施工是一个三维问题,在目前技术条件下,做三维洞室群施工优化是不可能的,至多只能做少量的有代表性的方案的比较。

4.8 从表 2 可以看出,在实际存在的地应力情况下(情况 A),广蓄电站采用的洞室布置和施工分块能达到最优效果,但是实际采用的施工步骤并不是最佳的,与最佳方案在破损区面积上相差 12%,边墙最大水平位移则没有什么区别。

最后需要指出的是,本文所用的方法只是在洞室施工分块已经决定的情况下搜索最佳施工方案,即最佳施工开挖顺序。这个最佳方案只是从力学稳定的角度而言的。如何做到既在力学上稳定,又在施工上经济、快速、方便,还必须依据现场施工的具体条件与施工工程师共同来完成。

5 参考文献

- 1 俞裕泰, 黄赛超. 坚硬而不完整岩体中地下洞室的分期开挖. 地下工程, 1984年11月, 31-35.
- 2 杨奇, 李青其. 东风水电工程地下厂房开挖顺序对围岩稳定的影响. 复杂岩石中建筑物学术会议, 北京, 1985.
- 3 杨淑清. 地下洞室围岩开挖稳定分析. 武汉水利电力学院学报, 1986, 73-82.
- 4 Zhu Weishen, Wu Bailin, Lin Shisheng. Optimum non-linear analyses on reasonable excavating order and anchoring treatment of large sized rock chambers. Int. Symp. on Large Rock Caverns, Helsinki, 1986.
- 5 Dolezelova M. The influence of construction work sequence on the stability of underground openings. Proc. 3rd Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, Aachen, 1979, 561-569.
- 6 Yoichi H, Yamashita R. Study on the stability of a group of caverns. Fifth Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, Nagoya, 1985, 1201-1206
- 7 伦库伯等著, 张有为译. 动态规划导论, 北京: 国防工业出版社, 1985.

APPLICATION OF DYNAMIC PROGRAMMING IN CONSTRUCTION MECHANICS OF CAVERN GROUPS

Zhu Weishen Wang Ping

(*Institute of Rock and Soil Mechanics, Academia Sinica, Wuhan 430071*)

Abstract

In this paper, the research on the influence of excavation sequence on surrounding rock stability in the world is reviewed and the concept of construction mechanics of cavern groups is presented. Based on the principle of dynamic programming and taking the area of failed zones around caverns as the return function, a method for searching the optimal construction scheme is given. Taking the cavern of a power station in Guangdong Province as an example, optimizing analysis of the construction sequence for four different cases of geostress field is performed, the stability of the real construction steps is assessed and some significant conclusions are obtained.

Key words: dynamic programming, cavern group, episodic and segmentalized excavation, optimizing analysis.