岩体初始地应力场对地下洞室围岩变形及应力的影响

邵国建

王东升

(河海大学土木工程学院 南京 210098)(盐城市劳动局安全检测站 盐城 224002)

摘 要 基于施工力学的分析方法,建立了地下洞室开挖仿真计算的有限元列式.施工过程中岩体 初始地应力场的释放而引起的卸荷是影响洞室稳定的主要因素.结合工程实例计算,分析了初始地 应力场对地下洞室围岩变形、应力的影响,结果表明,岩体的初始应力场侧向应力分量愈大,洞室侧 墙内缩位移愈大而环向压应力则有所减小,并使得顶拱沉降位移减小,环向压应力增大.

关键词 施工力学 初始应力场 地下洞室 仿真计算

中图号 U449

施工力学是对施工过程中结构和工程介质进行力学分析的一门新学科¹¹.在地下洞室开挖过程中,其分 析对象随时间(开挖)不断变化(包括几何参数及边界))随着岩体初始应力场的释放而引起的卸载,造成地应 力扰动与洞室围岩变形.在开挖过程中,第一级开挖造成的地应力场扰动而引起的岩体应力重分布,会影响 到第二级释放载荷的取值,同样再下级释放载荷的取值,要取决于前几级开挖对地应力扰动而引起的新的地 应力状态,这样释放载荷在每一级都有变化.要搞清开挖过程中地应力变异与洞室围岩稳定性,只有通过施 工力学分析才能得到.地下工程的失稳主要由于开挖过程中引起的岩体应力重分布超过围岩强度或引起围 岩过分变形而造成的,而开挖施工过程中应力重分布是否会达到危险的程度要看初始地应力场的具体情况 而定,所以初始地应力是影响地下洞室工程稳定的最主要的基本因素之—^[2].

1 开挖仿真计算方法

1.1 分级开挖计算的有限元列式

施工开挖过程实际上是岩体地应力场的释放过程,用释放的岩体初始地应力所对应的等效结点力来计 算开挖的影响.有限元法中对每一个结点而言,所受到的力是平衡的,当挖去与*i*结点相接的一个单元时,*i* 结点上由于开挖单元的地应力释放而引起的开挖外力为:

$$\boldsymbol{F}_i^e = \boldsymbol{P}_i^e - \boldsymbol{R}_i^e \tag{1}$$

式中 : R_i^e ——该单元所受荷载在 i 结点上的贡献 ,对地下洞室开挖问题 ,此处所指的荷载就为岩体的自重 ; P_i^e ——i 结点对该单元所施加的结点力.

这样,对每一级开挖卸荷效应,在开挖边界面上由于岩体地应力释放引起的开挖力可以用增量形式的等 效结点载荷来表示^[3,4],有

$$\Delta \boldsymbol{F} = \sum_{N_{de}} \left(\int_{V_i} \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\sigma}^0 \mathrm{d} V - \int_{V_i} \boldsymbol{N}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\gamma} \mathrm{d} V \right)$$
(2)

式中 :右边第一项为因开挖单元初始地应力释放而引起的等效结点力 ;第二项为岩体自重引起的等效结点载 荷 ;N_{de}——本级开挖单元总数 ;**o**⁰——开挖单元在开挖前的地应力 ;γ——岩体的容重 ;V_i——第 *i* 个开挖 单元的体积.有了式(2),在力学分析上就可将洞室分级开挖问题转化成分级加载的非线性计算问题.于是就 得到每级开挖仿真计算的控制方程:

$$\boldsymbol{K}_{d} \Delta \boldsymbol{\delta} = \Delta \boldsymbol{F} - \boldsymbol{Q}_{d} \tag{3}$$

收稿日期:1999-04-21

第一作者简介 邵国建 ,男 ,博士 ,副教授 ,水工结构专业.

式中 : K_d ——开挖单元作为空气单元后得到的整个计算域的刚度矩阵 : $\Delta \delta$ ——本级开挖引起的位移增量 ; O_d ——进行本级非线性迭代计算时的初始不平衡余量.

1.2 两点说明

关于公式(2)中 **o**⁰的取值问题,对第一级开挖,**o**⁰就为该级开挖单元的岩体初始应力状态,而对以后各级开挖单元,因前几级开挖造成的对岩体应力场的扰动而引起新的地应力状态,在开挖边界面计算由开挖引起的开挖力时,均要计入前几级开挖引起扰动的影响.

关于岩体初始地应力场问题,一般根据几个实测点的地应力值通过回归反演得到大区域下离散点应力 值,再通过拟合计算,得到计算域中的初始地应力场.初始地应力场往往是不完全满足平衡要求的,建议在开 挖计算前对初始地应力场进行一次平衡修正,经修正后的平衡应力场作为岩体初始应力场.

2 工程实例与成果分析

2.1 工程概况

某地下洞室体系布置为 :横向有主厂房和主变室 ,纵向有进水洞、母线洞和尾水洞 ,共有四台机组 ,地下 厂房环境地质条件较差 ,岩层软硬相间 ,且有断层穿过.洞室开挖自上而下按八级进行.应工程设计单位要 求 ,按两种岩体初始地应力场平行计算、分析对洞室稳定的影响.第一种初始地应力场取自重作用下产生的 应力场 ,第二种初始地应力场为根据实测点地应力值回归得到的应力场.两种不同的初始应力场在实测点处 的应力值列于表 1.

由表 1 中的应力值可看出,实测地应力值 σ_x 为自重场下在对应点处值的 1.33 倍 σ_y 为自重场下对应点 处的 1.31 倍 ,而 σ_z 为自重场下对应点处的 0.96 倍(接近于 1.0).

2.2 计算成果分析

为了便于分析比较,按第一种初始地应力场 计算称为工况 A,按第二种初始地应力场计算称 为工况 B.以下重点对2号机组剖面进行分析.

对工况 A 和工况 B,分级开挖完工后 2 号机 组中心剖面洞周特征点最大径向位移列于表 2, 洞周总位移分别见图 1(a)b),图表中均不计天

≢ 1	いう	占か	白白	ц <u>т</u> .	力信	ī
ৰহ ।		ыxг	נים	<u>IYY</u> .	ノノコミ	L

Table	1 Val	Values of stress measured in situ				MPa
	σ_x	σ_y	σ_z	$ au_{xy}$	τ_{yz}	τ_{zx}
回归场	3.30	2.55	4.85	0.55	-0.99	-0.82
自重场	2.48	1.95	5.04	0.05	-0.34	-0.48

注:应力分量的坐标系为地下厂房坐标系即轴 x 为厂房轴线 方向:轴 z 为铅直向上方向:轴 y 为垂直于厂房轴线指向下游;应 力符号采用土力学中的符号规定。

然状态下已完成的变形量,而2号机组洞周围岩各特征点的最大环向应力列于表3.



图 1 两种工况下 2 号机组中心剖面洞周总位移/cm

Fig.1 Total displacement of the central section of No. 2 generating unit

从表 2 中洞周最大径向位移 成果来看,两种初始地应力场下主 厂房及主变室的的变形具有相同之 处是:下游侧墙位移均大于上游侧 墙位移.两种工况下的变形不同之 处是:工况 B 的侧墙位移较工况 A 要大,而拱顶沉降工况 B 较工况 A 要小.对于主厂房,上游侧墙最大径

表 2 2 号机组中心剖面洞周最大径向位移

 Table 2
 Maximum displacement of the central section

		(of No. 2 ge	nerating u	ınit	cm
位黑	主厂房					
卫直	拱顶	上游侧墙	下游侧墙	拱顶	上游侧墙	下游侧墙
工况 A	0.04	3.30	3.87	0.19	0.35	0.54
工况 B	0.04	3.47	4.18	0.10	0.23	0.86

向位移工况 A 为 3.30 cm ,工况 B 为3.47 cm ,工况 B 较工况 A 增大 5.55% ,主厂下游侧墙最大径向位移由工况 况 A 的 3.87 cm 增大到工况 B 的 4.18 cm ,工况 B 较工况 A 增大 8% .对于主变室 ,洞周径向位移值两种工况 下均较小 ,主变室上游侧墙最大径向位移工况 A 为 0.35 cm ,工况 B 为 0.23 cm ,主变室下游侧墙最大径向位移工况 A 为 0.35 cm ,工况 B 为 0.23 cm ,主变室下游侧墙最大径向位移工况 A 为 0.54 cm ,工况 B 为 0.86 cm ,而主变室拱顶沉降由工况 A 的 0.19 cm 降到工况 B 的 0.10 cm.至于 主变室上游侧墙内缩位移 ,工况 B 反而比工况 A 小 ,可能是受主厂房下游侧墙向上游有较大变形的影响造 成的.另外 ,从图 1 中可以看出 ,两种地应力场下主厂房洞周总位移在局部点处由于塑性区域的差异 ,工况 A 与工况 B 在局部点处差异最大值发生在主厂房下游侧墙尾水洞出口交汇处 ,总位移值由工况 A 的 2.47 cm 增大到工况 B 的 3.68 cm ,其相对改变量为 49%.

从表 3 中洞周围岩各特征点的最大环向 应力可看出,工况 B 较工况 A 拱顶压应力值 有所增加,工况 A 主厂拱顶环向压应力为 3.4 MPa,工况 B 为 5.9 MPa,主变室拱顶环向 压应力工况 A 为 2.2 MPa,工况 B 为 3.3 MPa, 而主厂及主变室上游侧墙环向压应力工况 B 较工况 A 却有所减少,这是由于工况 B 较工 况 A 释放的初始地应力值要大的原因.全域 最大环向应力工况 A 为 20.6 MPa,发生在主 厂房上游侧墙进水口处,而工况 B 全域最大 压应力为 23.3 MPa,发生位置下移到主厂房 底部与尾水洞交汇处.

3 结 语

结合工程实例,分析了不同岩体初始地 应力场对地下洞室围岩变形、应力的影响,从 提供洞周各特征点的位移和应力可得到一些 供工程单位设计参考的结论,初始地应力场

表 3 2 号机组中心剖面洞周最大环向压应力分布

. . .

.

	Table 5 Maximum ring direction stress on No. 2				
		generating unit center section	n MPa		
仚	立 置	工况 A	工况 B		
	拱顶	3.4	5.9		
主	上游拱脚	12.9	13.1		
Г	下游拱脚	16.1	14.9		
房	上游侧墙	20.6	16.6		
	下游侧墙	14.5	9.6		
	拱顶	2.2	3.3		
ŧ	上游拱脚	10.5	9.7		
变	下游拱脚	10.7	10.5		
室	上游侧墙	9.8	8.8		
	下游侧墙	11.5	10.4		
全	最大	20.6	23.2		
亠 域	位置	主厂房上游侧 墙进水口处	主厂房底部与 尾水洞交汇处		

的差异,主要表现在侧向地应力分量的不同,而侧向应力分量对洞周围岩的变形和应力影响明显.对洞周变 形而言,岩体初始应力场侧向应力分量愈大,意味着在洞周开挖过程中侧向释放的应力愈大,导致侧墙内缩 位移增大,而拱顶沉降位移因回弹反而有所减少.对洞周围岩应力而言,侧向初始地应力愈大,使得洞室顶拱 环向压应力增大,而侧墙环向压应力反而有所降低. 2

3

参考文献

1 曹志远.土木工程分析的施工力学方法.工程力学,1996(增刊).71~77

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.北京 科学出版社,1995.5~7

张能林,王润富,卓家寿,地下工程的开挖模拟计算,水利水电科技进展,1995,15(5);42~44

4 刘钧.关于地下工程的开挖计算.水文地质工程地质,1991,18(3)27~31

Influence of Initial Stress Field of Rock Masses on Deformations

and Stresses of Surrounding Rock of Underground Openings

Shao Guojian

(College of Civil Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098)

Wang Dongsheng

(Safety Monitoring Station of Yancheng Labour Burean, Yangcheng, 224002)

Abstract On the Basis of analysis of construction mechanics, FEM formulae of excavation emulation computation for underground chambers are developed in this paper that the unloading caused by the release of the initial stress of rock masses in construction is the major factor affecting the stability of the surrounding rock of underground openings. The computation of an engineering project is given , and the influence of the initial stress field of rock masses on the deformation and stress of the surrounding rock of underground chambers is analyzed. It is shown that the more side stress in the initial stress field , the larger displacement in the side wall of the underground chember , but the less ring stress. As a result , the settlement displacement of the top arch reduces , and ring stress increases.

Key words construction mechanics ; initial stress field ; underground chambers ; emulation computation