

地下厂房围岩稳定分析若干问题探讨

董学晟

(长江水利水电科学研究院, 武汉)

提 要

地下厂房稳定分析首先要确定围岩变形破坏运动类型。本文按照四种岩石力学条件从工程实践中归纳了五种变形破坏运动类型, 以便在设计阶段进行初步判断和选择岩体力学模型, 并以三峡工程地下厂房为实例, 着重研究了块体结构的围岩稳定分析方法。在建立围岩力学模型时, 要结合地下洞室的尺寸处理不同规模的不连续面。三个方向的应力对块体稳定性的影响同样重要, 在没有条件使用三维有限单元法时, 可用全空间赤平投影法与二维有限单元法结合计算。研究结果表明, 在设计地下洞室方向时, 不仅要考虑初始应力的方位, 同时还应考虑软弱结构面的方向。

前 言

三峡太平溪坝址——三峡工程两个坝址之一, 两岸山体雄厚, 峡谷较陡。水工布置中通常要考虑建设大跨度、高边墙的地下厂房及其它地下洞室群。这里岩体虽十分坚硬, 但由于跨度太大(近40m), 人们对它的稳定性有些担心。为了粗略地估计这种跨度地下洞室的围岩稳定性, 须进行概略的分析和计算。本文就这些工作中遇到的问题进行粗浅的探讨, 提出一些不成熟的意见和看法。

一、关于围岩变形破坏类型问题

为指导地下工程的设计和施工, 国内外提出了几十种围岩分类方法^{*}。这些方法总结了大量地下工程建设经验, 对于小型工程、临时性工程或者通过多种岩体的长隧洞均是十分有用的。但是对于大型洞室, 特别是各种永久性的地下洞库, 例如水电站地下厂房还需针对围岩的各种具体条件进行仔细地稳定性研究。随着岩石力学的发展和有限单元法的应用, 许多适用于不同条件下的稳定分析方法也得到了发展。显然除已有的围岩分类法外, 还应根据所要采用的稳定性研究方法(及随之而来的设计方法和程序)来划分围岩种类。

英国皇家科学工艺学院岩石力学小组把矿井围岩失稳现象按其原因为四种^[1]: ①由于不利的地质构造引起的失稳, 主要发生在有几组陡倾角的不连续面(断层、节理)的坚硬岩体中; ②由于过高的岩体应力引起的失稳, 常常在深埋矿井或浅埋大断面洞室或高山隧道中发生; ③风化岩或膨胀岩引起的失稳, 主要在较软弱岩体中发生。在坚硬岩体中夹有软岩岩层时, 也会发生这种失稳; ④过高的地下水压引起的失稳。

^{*} 中国人民解放军89003部队, 国内外围岩分类资料汇编, 北京, 1979年5月

针对上述失稳原因和场所,相应地制定了一套围岩稳定分析与地下洞室设计程序。这里包含了四种影响围岩稳定性的因素:岩性软硬、岩体被结构面切割的程度、岩体初始力大小以及地下水的作用(风化和膨胀实际上也是水的作用)。一般的围岩分类,有的主要只考虑了岩体弱面(结构面)的分布与组合情况(例如按岩体结构类型分类,按裂隙特征、裂隙系数分类),有的着重考虑了岩体结构与岩性(强度、变形性等)两方面因素(例如按照抗压强度、内摩擦角分类,按照单位抗力系数的分类,按照声波纵波波速的分类),有的虽然考虑了多种影响因素(例如水电部岩石试验规程中的分类,考虑了岩体完整性、岩石质量、风化程度、地下水影响等四个因素),但实际上可归结为岩性、岩体结构(完整性)和水的影响三种,却都没有考虑岩体初始应力(开洞前岩体中自然存在的应力)。而岩体的初始应力是地下洞室存在的基本条件之一,是影响围岩稳定性的重要因素。脱离了岩体应力状况,围岩稳定性分析就无从谈起。

实际工程中这四种影响因素是同时发生作用的。依据岩性的软弱或坚硬,岩体结构面及其组合情况,初始应力大小以及地下水活动的程度,可以形成各种围岩变形破坏运动类型即多种围岩失稳。分析一些工程实例,可以得到五种常见的围岩变形破坏运动,即五类围岩失稳现象^[2]。

1. 岩石块体错动、滑移和崩塌。主要发生在岩性较坚硬,而岩体又为断层、裂隙等弱面交叉切割的情况。当初始应力较大时,弱面上的应力可能超过抗剪强度,块体发生剪切位移以致崩塌破坏;而在初始应力不大时,块体主要受重力作用其稳定性视具体情况而定。

2. 岩体脆性开裂。这种破坏往往发生在围岩很坚硬、弱面较少且不育的情况。在初始应力为中等值时,或者剪应力高度集中并超过了岩石的抗剪强度,或者出现拉应力超过岩石的抗拉强度,则岩石均产生裂缝。当地下洞室较多,相互交错重叠,次生应力状态非常复杂,在洞的交叉转角处,或相邻洞室的岩壁或岩柱上,应力高度集中,就会有平行、成组的裂缝产生。

3. 顶拱塌落。在十分破碎、松软、初始应力不大的岩体中,洞室顶板会塌下来形成一个自身稳定的新的拱形洞顶——自然拱。当围岩被视为松散介质时,上述情况多发生于穿过风化带或软弱夹层的洞段或厂房进出口段。

4. 断面压缩。当岩性较软,具有明显的塑性和流变性时,在围岩次生应力作用下,洞壁逐渐向里挤压,底板隆起,顶板岩层压碎。初始应力越大,这种断面压缩的变形破坏现象越急剧,有的甚至在施工过程中洞的断面就显著减小。

5. 岩爆。在岩性十分坚硬并具脆性、岩体很完整、初始应力很大的条件下,洞室施工中会有岩爆发生。岩爆的一般解释是:由于围岩应力高度集中,积聚了大量弹性应变能,遇到某种偶然刺激因素——所谓板机效应,平衡破坏了,弹性应变能急剧释放造成的破坏现象。若用断裂力学的观点看,岩爆发生前,围岩应力普遍接近强度极限,微裂隙尖端的应力也多处于裂纹传播的临界应力,许多微裂隙尖端附近的 k_1 值都接近于岩石的 k_{1c} 值。在这种情况下,由于施工爆破震动或巷道推进而产生的哪怕是一点点附加应力,会使某些微裂隙迅速延伸发展,将应力转移到别的微裂隙上,形成剧烈的“连锁反应”,围岩急剧破裂。

上面提出的四种影响围岩稳定性的因素和五类主要的围岩变形破坏型式,如作为严格的围岩分类办法,需进一步研究定量的指标。但在地下工程设计的初始阶段,按照这种模式进行初步分析,并根据实际条件,可以判断可能发生的围岩变形破坏型式,并正确地选定力学模型稳定分析方法和设计程序。

以三峡太平溪坝址地下厂房为例。该地下厂房位于右岸,岩体为前震旦纪石英闪长岩,

除表层风化壳外,新鲜岩石强度很高,单轴抗压强度平均达 1500kg/cm^2 ,变形模量亦高达 $73 \times 10^4\text{kg/cm}^2$,试验时破坏都是突然发生的,没有明显的屈服点,说明岩石具有脆性。厂房附近没有大的断裂破碎带通过,但有五组构造断裂,平均间距 $4 \sim 5\text{m}$,将围岩切割成各种尺寸和形状的块体,断裂面的抗剪强度都不高。试验洞内用 $CJS-1$ 型三向钻孔应力计测得岩体初始应力为最大主应力约 140kg/cm^2 ,其方向基本与地下厂房轴线平行,与一般实测资料相比,属于中等应力值。厂房区的地下水不多,也没有遇水膨胀、软化的岩层。根据这些岩石力学条件,按上面的围岩变形破坏类型,可以初步判断,三峡太平溪坝址右岸地下厂房可能发生的围岩失稳现象有两类,一类是应力超过岩体强度产生裂缝。例如:围岩拱顶可能出现拉应力,拱脚或底板两侧剪应力可能超过抗剪强度,出现拉裂缝和剪切裂缝,或者与围岩中原有的构造断裂面相交错,或者沿着断裂面发展,使构造断裂延伸贯通。另一类是五组构造断裂面将厂房边墙或顶拱切割成的岩石块体,在次生应力作用下可能发生剪切位移或者崩塌下来。

据此可以简化岩体力学模型用非线性有限单元法计算围岩应力分布,分析是否会发生应力裂缝。然后用赤平投影或其他块体平衡分析与有限单元法计算结合,研究是否会发生岩块崩塌。

二、围岩不连续面分析

在确定围岩变形破坏类型及力学模型时,要对它的岩石力学条件进行简化。无论用有限元法计算还是做岩体力学模型试验,必须解决如何处理断层、节理、层面、裂隙等不连续面的问题。这些不连续面有贯穿整个工程区域的大断层,也有勉强为肉眼所辨认的微裂隙,尺寸相差悬殊,这是岩体区别于其它介质的主要特点。可以说,没有不包含不连续面的岩体(石),所谓完整的整体的岩石只是相对的。不连续面的大小(包括长短、宽窄和间距)不同,对围岩力学性质及其变形破坏运动的影响也不同。应对它们与洞室尺寸的比例关系及相对位置进行分析。

距离较远不通过地下洞室围岩的大断裂,其影响主要是改变洞室区域的岩体初始应力状态。如果已经实测了岩体初始应力,在围岩力学模型中,这种断层可以不予考虑,或者作为边界条件处理。次一级贯穿地下洞室区域的断裂,其长度与洞室尺寸同一量级,可能平行、成组出现。在计算分析或模型试验中,形成介质的不连续面。尺寸比洞室小得多的小裂隙数量很多,无法逐一考虑其力学影响,在力学模型中,可用适当降低岩石(体)的力学参数的办法来解决。

例如,三峡太平溪坝址14条长度大于 500m ,宽度大于 1m 的断裂破碎带,都没有通过右岸地下厂房区,又已测试了厂房区的岩体初始应力。在分析计算时不再考虑其影响。其次,地下厂房的勘探平洞揭露了145条构造断裂,长度由几米到几十米,破碎带宽度一般都小于 0.5m ,按产状可分成五组。间距由十几米至四、五十米,与地下厂房的跨度相当,把围岩交叉切割完块体。在力学分析中主要应考虑这些不连续面的影响。勘探平洞还揭露了更小的构造裂隙,长度一般小于 2m ,平均每 1.5m 一条,宽仅 $1 \sim 2\text{mm}$,多为绿帘石和方解石充填。在研究跨度近 40m 的巨型洞室时,要考虑几百米的范围,包括几百条这种小裂隙,不可能也不必逐一研究其对围岩稳定性的影响。而在确定石英闪长岩的力学强度时只需按充填了

新鲜方解石的裂隙的强度取值,如完整岩石的抗剪强度很高,计算中降低为 $c = 12 \text{ kg/cm}^2$, $\tan \varphi = 1.7$,完整岩石的抗拉强度高达几十 kg/cm^2 ,计算中取为 8 kg/cm^2 。

三、关于块体结构的围岩稳定计算方法

分析块体结构围岩的稳定性,比较流行的是各种投影作图法。这类方法的优点是能把三维空间的块体在平面上表示出来,特别是全空间赤平投影法^[1],可以在投影面上研究多组结构面和临空面组合形成的各种块体的几何形状及其与洞室临空面的相对关系,用以分析块体在重力作用下可能的塌滑方向和塌滑力。

但它们都没有考虑岩体初始应力及围岩次生应力,仅仅分析了重力及滑动面上的摩擦力。对于高度不大的边坡上或地下洞室中已与围岩脱开了的块体,这样做是可以的,但是要分析围岩中哪些块体可能错动脱开以致崩塌,必须把投影作图的分析方法与有限元法计算结合起来,以研究次生应力场中块体各界面上的应力状态。

理想的办法是,按照围岩结构面的分布划分三维单元,编制三维非线性有限元计算程序进行围岩的应力位移计算。但目前还没有这样的程序,即使编出了这种程序,也需要大容量的电子计算机和十分繁重的辅助工作。比较容易办到的是平面(线性和非线性)有限元法计算,按以下的六个步骤进行分析计算是适宜的。

第一步,简化地质条件,除了宽度较大的节理面外,别的暂且都不考虑,选择洞室中具有代表性的横断面用平面有限元法计算围岩应力位移状态。分析三峡太平溪坝右岸地下厂房非线性平面有限元法计算结果*(图1),没有应力超过强度极限的单元。如不考虑三维应力状态及节理切割的影响,围岩是稳定的。

第二步,用全空间赤平投影法分析地下厂房临空面上可能出现的不稳定结构面组合,计算块体在重力作用下的下滑力,分析那些结构面组合切割的块体可能是危险的⁴。

第三步,绘制洞室临空面上各组结构面出露的图象(洞室施工之前,只能绘出可能出现的图象),分析可能滑塌的危险块体,确定块体的形状和大小(投影几何作图或解析几何求解),对太平溪地下厂房五组节理进行分析,上游边墙的节理如图2,除掉那些插入端墙和地板的块体外,有两种可能滑动的块体,沿第一、四组和沿第四、五两组节理面交线的块体。图2上用粗线勾出由第五节理面和边墙面形成的危险块体ABHJI,宽38m,高约30m,厚12m。图3为其投影图。

第四步,计算危险块体各节理上的应力,按有限单元计算中的单元位置,将各节理面在洞室横断面上的投影划分成小单元(图3),根据作用于小单元上的应力分量 σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} (按平面有限元计算结果取值)和 σ_y (在洞轴线与初始应力场最大主应力方位基本相同的情况下,开洞后沿洞轴方向的应力分量改变不大, σ_y 可按初始应力在 y 轴上的分量取值)算出正应力 σ_n 和剪应力 τ 。

第五步,计算安全系数。按节理面的抗剪强度先计算各小单元的抗滑稳定安全系数,再按面积加权平均,计算整个节理面(危险块体的一个面)的抗滑稳定安全系数。

第六步,块体稳定综合分析。根据块体每一面的应力状态和安全系数,分析这个面是否发生剪切错动以及错动的方向,考虑各面的运动情况综合判断块体的整体安全度,以便采取

*姚惠亮,三峡太平溪电站地下结构围岩稳定分部报告,长江水利水电科学研究所,1978年12月。

比例: $0.2 \text{ cm} = 100 \text{ kg/cm}^2$, 图例:

○—○ σ_x 曲线
 x—x σ_y 曲线
 □—□ τ_{xy} 曲线

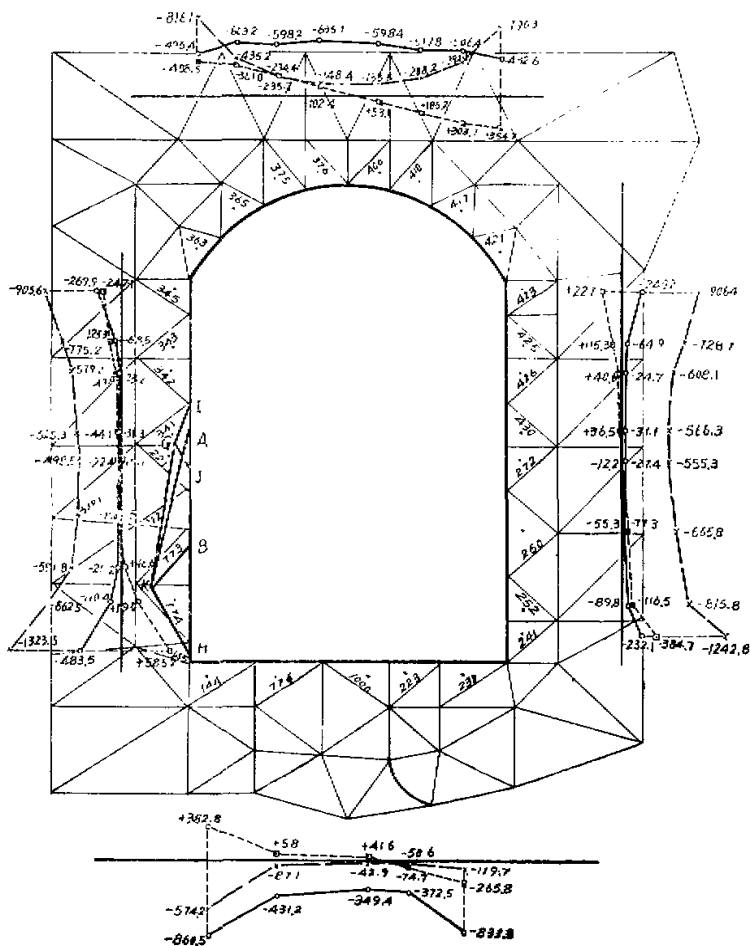


图1 三峡地下厂房正应力曲线图(非线性)

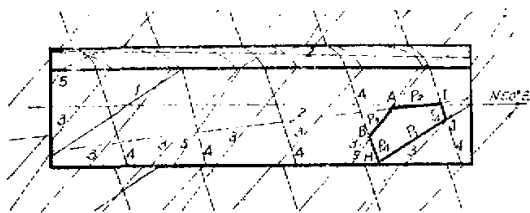


图2 地下厂房上游边墙结构图

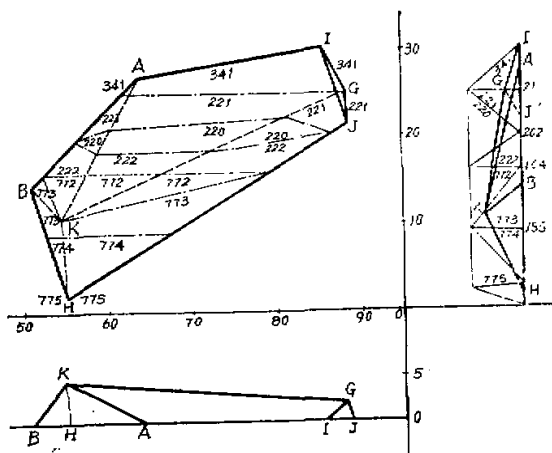


图3 上游边墙危险块本投影图

加固措施和修改设计。计算分析表明,块体 $ABHJIGK$ 有三个面不稳定; $AKGI$ 面向下错动, ABK 面向右错动, $HJGK$ 面向左上方错动,而 BHK 及 IGJ 两面虽然抗剪强度低,但由于正应力大,安全系数都大于1,整个块体有被围岩挤出的趋势。

结 语

水电站地下厂房围岩稳定分析的首要问题是确定围岩变形破坏运动类型。在勘测设计阶段,可以根据围岩的岩性、岩体完整程度(结构面切割的情况)、岩体初始应力、地下水等四个岩石力学条件对围岩变形破坏的类型进行初步判断,并选择供稳定分析用的围岩力学模型。

大型水电站地下厂房多建于坚硬岩体中,块体崩塌是主要的破坏形式之一,在建立这种围岩的力学模型时,要结合洞室的具体尺寸分析,简化岩体各种规模的不连续面。

研究块体结构的围岩稳定性,仅有二维应力分析是不够的,因为三维块体不符合平面应变(或平面应力)条件,三个方向的应力对块体稳定性的影响都同样重要。对洞室横断面仅作平面应力分析时,围岩可能是稳定的,但在轴向应力作用下,有的块体可能就不稳定了。

全空间赤平投影法,可用于对块体结构的围岩稳定性作初步定性的评价,此法与有限元法相结合就能进行具体的分析和定量的结论。理想的办法是三维弹塑性有限单元法,但要结合结构面的组合情况来划分单元。

在设计地下洞室时,固然要尽量避免洞轴线与岩体初始应力最大主应力的方位垂直,但还要考虑比较软弱的结构面组的方向,如果洞轴线与最大初始应力主应力方位一致,巨大的轴向应力会使那些与洞轴交角接近 45° 的结构面上产生很大的剪应力。

以上肤浅的看法,还有待深化和发展,并通过工程实践来充实和修正。

本文承姚慈亮同志提供有限元计算成果,谢元慧等同志整理计算,在此表示感谢

参 考 文 献

- (1) Brown, E. T., Recent Advances in the Application of Rock Mechanics in Mining Excavation Design, Institution of Mining and Metallurgy Mission to The People's Republic of China, Oct. 1979.
- (2) 董学晟, 关于地下洞室稳定性问题, 人民长江, 1980年第3期, 第65~71页。
- (3) 石根华, 岩体稳定分析的赤平投影方法, 中国科学, 1977年第3期。
- (4) 孙国伟, 碧口水电站调压井高边坡岩体稳定分析及锚喷支护, 地下工程, 1979年, 第4期, 第17~25页。

Some Problems on The Stability Analysis of Underground Openings

Dong Xue-cheng

(Yantze River Water Conservancy and Hydroelectric Research Institute, Wuhan)

Abstract

The first thing in the stability analysis of underground openings is the determination of the deformation failure-movement type of rock masses. In this paper five main types of deformation failure-movement has been mentioned, according to different combinations of the four rock mechanics factors. Thus, primary appreciation of stability and selection of mechanical model for the rock mass can be made in design work. Some methods of stability analysis for rock mass composed of rock blocks has been discussed, referring to the underground power station of The Three Gorges project as an example. Planes of discontinuity should be simplified according to their relative size to the dimensions of the cavity. The influence of the stress component along the axis of the cavity on the stability of rock blocks has been emphasized. In those cases when finite element method in three-dimensions can not be used, calculations may be carried out by two-dimensional finite element method in combination with the method of the whole space projection on equatorial plane. When the orientation of the axis of cavity is to be determined, not only the direction of the maximum in-situ stress but also the azimuth of planes of discontinuity should be considered.