

地下工程复杂岩体稳定性的初步判断

杨子文

(水电部鲁布革工程管理局)

刘成旺

(水电部成都勘测设计院)

引 言

1983年10月10~15日在澳大利亚墨尔本召开的第五届国际岩石力学大会上，有近40%的论文涉及地下工程，说明近年来由于世界性的能源紧张，各国都已注意到地下空间的开发和利用。为此，地下洞室的围岩稳定，成为岩石力学研究的重点。新奥法在国际上的普遍使用，成功地修建了宽达33.4米的西德瓦尔德克抽水蓄能Ⅱ级地下厂房、闻名世界的长达23.3公里的日本青函海底隧道，盐岩中开挖了跨度达40米的永久性地下洞室等。这些地下工程，在开挖和营运期间，是不允许发生显著变形和破坏的。岩体稳定性的判断，就是要在地下工程开挖之前和在开挖过程中，在工程地质基础上，针对拟建工程部位岩体的工程围岩稳定性作出是否稳定的判断。

影响地下洞室围岩稳定性的因素

影响地下洞室围岩稳定性的因素可归纳为：岩体自身的特性，地下水，地应力状态与工程有关的因素等。

岩体自身的特性包括：组成岩体的岩石本身工程质量的好坏；反映岩体工程质量优劣的岩体结构特征；岩石和岩体的风化程度及抗风化能力。

地下水指岩体处于干燥、饱和或压力水的状态。

初始地应力状态，在中、高地应力状态地区，这种地应力状态会给工程的兴建带来一些麻烦。

与工程有关的因素，包括岩体平均块体尺寸与拟建工程规模大小之间关系的隙跨比；洞轴线与结构面产状的相互关系；洞室开挖方法等。

判断围岩稳定性的建议方法

目前用于判断地下工程围岩稳定性的方法较多，归纳起来可分为四大类：工程地质法，岩体分类法，模拟试验法，图解法等。

岩体稳定性评价方法的发展，是一个从定性到定量逐步发展的过程。其中尤其是利用有限元、边界元的计算法，不仅可解决连续弹性、弹塑性岩体，而且已能解决块状、层状等不连续岩体的稳定性问题，甚至已可用于分析流变问题。对于重要工程来说，往往是多种方法并用的。

在上述四种判断围岩稳定性的方法中，前两种实际上是工程地质人员根据地质工作和少量测试参数，对岩体的稳定性作出判断的定性和半定量方法。后两者是根据地质工作和现场测试资料，由设计或科研部门进一步对围岩稳定性作出定量判断的方法。

鉴于工程地质方法较粗，岩体分类法又没有很好地解决稳定性的判据，以及因之而来在判断围岩稳定性时的人为因素影响仍然较大的现状，笔者在参与水利水电工程喷锚支护设计施工技术规范编制时，提出了一种“和差计分与经验判断相结合”的方法，用定量的指标初步判断地下工程复杂岩体的稳定性。

在此，考虑了地下水，岩石与岩体的工程质量，岩体的破碎程度，风化程度，软弱结构面特征，结构面产状与工程轴线的相互关系，岩体平均块体大小与工程洞跨大小的相对关系的隙跨比，地应力，开挖方法等因素，并将这些因素分为四种情况，编制了一张“和差计分与经验判断围岩稳定性”的分级表，如表1所示。

当总分 >80 分时，岩体稳定；80~60分时，岩体基本稳定；60~40分时，岩体中等稳定；40~20分时，岩体稳定性差； <20 分时，岩体不稳定。

表1 补充说明如下：

1. 对于高地应力地区，当最大主应力方向及其夹角与采用的洞形、相对位置不相适应时，应在总分中减去5~15分。高地应力区，指最大主应力 σ_1 与岩体强度(R)之比值大于0.25时的情况。无实际测试资料时，可用 $\gamma \cdot H/R$ 进行估算。 γ ，H分别为上复岩体单位重和厚度。

2. 对于采用掘进机或控制爆破开挖时，可对总分升高5~10分。

3. 岩石工程质量指标 S^{*2} 用下式计算：

$$S' = \left(\frac{R \cdot E}{20 \times 10^6} \right)^{1/3} \quad (1)$$

4. 岩体工程质量指标 M^{*1} 用下式计算：

$$M = S \cdot K_v \quad (2)$$

$$K_v = (V_{pm}/V_{pr})^2 \quad (3)$$

式中 R、E、 V_{pr} 分别为岩石的单轴抗压强度、弹性模量、弹性纵波速度， V_{pm} 为岩体弹性纵波速度。

5. S值通过实测获得，无测定值时用如下方式估计：

$S > 4$ 锤击声清脆，弹跳力很强，甚至感到震手，岩石致密，掷不碎，用地质锤劈开费力。

$S = 2 \sim 4$ 锤击声较清脆，有弹跳力反应，用地质锤敲击时，岩块易于劈开。

$S = 1 \sim 2$ 锤击声不清脆，无弹跳力或反应一般，用地质锤敲击时岩块易于劈开。长石类矿物晶体已不明显、有风化晕。

$S = 0.5 \sim 1$ 锤击声哑，并会出现凹痕，比红砖稍硬，易敲碎。

$S < 0.5$ 锤击声哑，镐或尖锄亦可撬动，浸水时明显吸水，抛掷时易碎。

6. K_v 值无实测资料时作如下估计：

$K_v > 0.9$ 岩石新鲜完整。裂隙极少，平均间距1~3米，裂面闭合无充填，压水时单位吸水量极微，呈整体大块状结构。

表1 和差计分与经验判断岩稳定性分界表

岩体工程岩体工程质量评价		优		良		中等		差		坏	
质量指标	指标 M•1 及评分	M>3	20~15	M=1~3	15~10	M=0.1~1	10~6	M=0.01~0.1	6~3	M<0.01	3~0
岩体软弱结构面特征及评分	岩体完整，软弱结构面极少，裂隙间距 1~3 米，密闭，不连通，面粗糙，岩壁为硬岩，岩质新鲜，无填充物，整体块状构造	壁为硬岩，面粗糙，部分接触，起伏差显著，有少量充填物，节理裂隙稍发育间距 1 米左右，微弱风化，块状结构。	软弱结构面连续，延伸性好，有岩碎屑石等充填其间，面平整，节理裂隙发育，间距 0.4~0.8 米，岩壁为中硬岩，中等风化程度，镶嵌状结构	软弱结构面连通，延伸性好，有岩碎屑石等充填其间，面平整，节理裂隙非常发育，间距 0.1~0.4 米，强风化，碎裂结构多小于 0.1 米，全强风化，散体结构							
工程轴线与结构面产状的关系	洞顶（ α 为工程轴线与产状夹角， β 为倾角）	$\alpha = 70\sim 90^\circ$ $\beta = 45\sim 90^\circ$	$\alpha = 30\sim 70^\circ$ $\beta = 45\sim 90^\circ$	$\alpha = 0\sim 30^\circ$ $\alpha = 30\sim 90^\circ$ $\beta = 20\sim 45^\circ$	$\alpha = 45\sim 90^\circ$ $\beta = 20\sim 45^\circ$	$\alpha = 0\sim 30^\circ$ $\alpha = 70\sim 90^\circ$ $\beta = 45\sim 90^\circ$	$\alpha = 20\sim 45^\circ$ $\beta = 45\sim 90^\circ$	$\alpha = 30\sim 70^\circ$ $\beta = 45\sim 90^\circ$	$\alpha = 0\sim 30^\circ$ $\beta = 0\sim 20^\circ$	$\alpha = 0\sim 30^\circ$ $\beta = 45\sim 90^\circ$	
适应性及评分	侧墙 不考虑 α $\beta = 0\sim 20^\circ$	有利	一般	16~12	一般	12~8	不利	8~4	最不利	4~0	
隙跨比 (L/b) 及评分	最有利 < 5	20~16	5~10	16~12	10~25	12~8	25~100	8~4	>100	4~0	
地下水评状态分	$S^*2 > 2$ 的硬岩 $S = 1\sim 2$ 的中硬岩 $S < 1$ 的软岩	干燥	20~19	潮湿	19~18	渗水	18~17	涌水	17~16	水下	16~15
		干燥	15~12	潮湿	12~9	渗水	9~7	涌水	7~6	水下	6~5
		干燥	10~7	潮湿	7~5	渗水	5~3	涌水	3~1	水下	1~0

$K_v = 0.75 \sim 0.9$ 岩石新鲜或微风化，裂隙间距 1 米左右，稍发育但闭合性好，一般无充填，透水性弱，呈块状、厚层状结构。

$K_v = 0.45 \sim 0.75$ 裂隙发育，其间有碎屑充填，大范围内有软弱夹层，平均间距约 0.4~0.8 米，压水时透水性中等，镶嵌结构。

$K_v = 0.20 \sim 0.45$ 岩块较硬，但十分破碎，裂隙密集，间距 0.1~0.4 米，其间有泥质或碎屑充填，透水性大，碎裂结构。

$K_v < 0.2$ 裂隙极发育，间距 < 0.1 米，或为断层破碎带、挤压破碎带或强烈影响带，未胶结，透水性极大，散体结构。

7. 岩体强度 $[R]$ ，可根据 M 值进行估计：

$$M > 3$$

$$M = 1 \sim 3$$

$$[R] > 1000 \text{ 公斤}/\text{厘米}^2$$

$$[R] = 400 \sim 1000 \text{ 公斤}/\text{厘米}^2$$

$$M = 0.1 \sim 1$$

$$M = 0.01 \sim 0.1$$

$$M < 0.01$$

$$[R] = 100 \sim 400 \text{ 公斤}/\text{厘米}^2 \quad [R] = 15 \sim 100 \text{ 公斤}/\text{厘米}^2 \quad [R] < 15 \text{ 公斤}/\text{厘米}^2$$

当 M 为任意值时，与其相应的 $[R]$ 可以内插。

8. 对于地下水状态一栏，考虑了三种情况，即硬岩、中硬岩、软岩，分别用 S 值加以判断。因水对这三种岩石的影响程度不同，故分别予以考虑。

9. 在结构面与工程的关系中，考虑了两项，一为工程轴线与结构面产状的相互关系。这时考虑到洞顶和侧墙所处部位不同，分别予以考虑。二是隙跨比（跨度 L 与平均裂隙间距 b 之比），即以平均岩块大小或平均的节理间距与工程跨度大小的相对尺寸表明岩体完整程度。事实上，在同一完整程度岩体内开挖不同洞径的洞室时，在各种条件相同前提下，由于隙跨比不同，它们的稳定性是不一样的。

10. 岩体工程质量指标 M 一栏，是希望对岩体工程质量好坏先有一个大致的定量评价，进而在 M 值与岩体的稳定性之间探索内在联系。

11. 当判断的岩体为两种或多种岩性组成时，以 S 值最小的岩性进行计算，只有当这种岩性在岩体稳定性判断中不起决定性作用时，才考虑 S 值较大的岩性。

实例分析

【例 1】引滦入津输水隧洞进口段，宽 6.9 米，高 7.25 米，为圆拱直墙形无压洞，洞顶上覆岩层厚 15 米。岩石为太古界上川组黑云母斜长片麻岩，石榴子石角闪斜长片麻岩及变粒岩，岩石呈松散破碎状，属全强风化，钻孔岩心获得率为零， V_{pm} 值仅 600 ~ 700 米/秒，节理间距 20~30 厘米，有夹泥充填。地下水较多，顶部滴水或呈流线，边墙局部股流，流量达 0.4 升/秒。洞口附近有断层 f_{64} ，其影响带宽达 3.5 米，断层泥厚 5 厘米，对洞口岩体稳定性影响很大，节理与洞轴线走向近于平行，对边墙稳定性不利。鉴于岩体十分破碎，构造应力也基本释放，初始应力仅为自重应力，又因洞子埋深较浅，自重应力也不大。按 1977 年水电岩石规程提出的岩石分类属于坏的 V 类岩体。按 Barton 的 Q 值分类法， $Q=0.013$ ，属极坏的岩体。地质鉴定认为进口段的岩体稳定性差。据此，从工程施工角度采用了喷锚及钢筋网架支护措施，并配合光面爆破的施

工工艺，成功地在上述围岩极为破碎条件下强迫进洞，取得了完全的成功。

分析 根据上述情况，依据表 1，给出如下资料及计分。 $M < 0.01$, 2 分；岩体结构特征，2 分；工程轴线与结构面产状按对侧墙稳定不利考虑，给 5 分；地下水状态，考虑岩石全强风化后强度很低，属于 $S < 1$ 的软岩范畴，给 3 分；隙跨比，据平均节理间距 25 厘米和洞跨 6.9 米考虑，算出为 27.6，取 7 分。共计 19 分，属不稳定岩体。由于地应力小，不予降分。因使用光面爆破，增加 8 分，这时总分达 27 分，属稳定性差的岩体；加之有效的喷锚支护，围岩能保持稳定状态。

【例 2】 南湾水库试验隧洞，洞宽 2.5 米，试洞穿过的 4^{-3} 层地层为断层破碎带，岩石为石英云母片岩， $R = 311$ 公斤/厘米²，其弹性模量 $E = 2.37 \times 10^4$ 公斤/厘米²，洞中心处于地下水位以下，单位吸水率为 $0.05 \sim 0.1$ 升/分。现场测得岩体的 $E_0 = 0.4 \times 10^4$ 公斤/厘米²，岩体纵波速度 $V_{pm} = 1000$ 米/秒，洞顶松动圈为 1.3 米。地质判断为碎块散体的不稳定地段。采用光面爆破，喷锚支护。已建三年，情况良好。

分析 根据上述资料，按表 1 进行评价计分：

$M < 0.01$, 2 分；结构面特征，2 分；产状与轴线关系，考虑试洞侧墙与结构面处于一般情况，10 分；隙跨比大于 100，4 分；软岩，处于水下，1 分，共计 19 分，属不稳定的岩体。由于采用光面爆破施工，增加 8 分，共 27 分，岩体属于稳定性差的岩体。加以有效的锚喷支护，试洞历时三年多，始终处于良好状态。

【例 3】 重庆金家岩铁路双线隧道，跨度 14 米，侏罗系风化残积层，大部分为砂岩和泥页岩互层，含煤屑。砂岩和泥页岩的强度分别为 100~200 和 60~100 公斤/厘米²。节理裂隙六组以上，非常发育。现场收敛试验测得顶拱下沉量大于 40 厘米，边墙每侧收敛值大于 10 厘米。属于隧洞围岩分类中的 II~III 级，相当于水电岩规分类的 IV~V 级。喷锚支护。

分析 $M \approx 0.01$, 取 2 分；结构面特征，5 分；工程轴线与结构面产状考虑为一般偏于不利，8 分；隙跨比，4 分；水的影响考虑起控制作用的极软岩，加之重庆多雨，岩体属风化残积层，按渗水处理，4 分。共计 23 分，属稳定性差偏于不稳定的岩体。

【例 4】 西洱河一级水电站地下厂房，开挖尺寸为 $56 \times 18 \times 28$ 米，轴线 N 80E。黑云母眼球状片麻岩偶夹有片岩，片岩为弱至强风化，顶拱有数条大裂隙，其产状为 N 40~60 W，倾向 NE， $\angle 50^\circ \sim 70^\circ$ ，间距 5~20 厘米，最大宽度达 50 厘米，岩体完整坚硬，洞顶上覆岩体厚 15~65 米，抗压强度 50~1000 公斤/厘米²。

分析 $M \approx 1$, 取 10 分；结构面特征，5 分；结构面与轴线关系一般，取 10 分；隙跨比，5 分；地下水状态，12 分，共计 42 分，属中等稳定岩体。

【例 5】 511 火电站主厂房，跨度 20 米，下侏罗系砂岩与粘土岩互层，产状接近水平，岩体比较完整，地下水不发育，砂岩强度 250~400 公斤/厘米²，粘土岩强度为 70 公斤/厘米²。喷锚支护。七十年代初期施工，1981 年时仍然情况良好。

分析 岩体 M 在 $0.1 \sim 1.0$ 之间，接近于 1.0，取 9 分；岩体结构特征取 14 分；产状与工程轴线关系有利，14 分；隙跨比约 20，取 11 分；水的影响考虑渗水、软岩，3 分。共计 53 分，属稳定性程度中等的岩体。

【例 6】 龚嘴水电站地下厂房中段（0+030~0+072），开挖跨度 30 米，轴线方

向 N $11^{\circ}59' E$, 上覆岩体厚 30~45 米, 弱风化花岗岩, 岩体尚称完整。裂隙间距 0.3~0.5 米, 大者达 0.5~1.0 米, 其中有 F₁ 小断层斜切拱顶中部, 断层带附近裂隙密集, 间距 0.1~0.2 米, 小者仅 2~3 厘米, 裂面有高岭土膜, 厚约 0.5~1 毫米, 结合较差。另有一组陡倾角裂隙分布, 同缓倾角裂隙组成八字形体, 主要裂隙产状为 N $68^{\circ} E$, NW, $\angle 25^{\circ} \sim 30^{\circ}$, N $50^{\circ} \sim 70^{\circ} W$, SW, $\angle 50^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 。地下水以滴水状态出露, 岩石强度为 1180 公斤/厘米²。地质给出 f=3~4。

分析 M=1~3, 14 分; 结构面特征, 10 分; 跨隙比 8 分; 结构面产状与工程关系很有利, 18 分。共计 68 分, 属于基本稳定的岩体。

结语

本文提出的方法, 在 1982 年提出时, 曾引起有关方面的注意和兴趣, 并提出了不少建议和修改意见。在上述方案的基础上, 经补充修改而成。但还可能有一些不妥之处, 敬请指正。

参 考 文 献

- [1] 傅冰骏: 参加第四届国际岩石力学大会汇报, 1983. 10
- [2] 车用太: 岩体工程地质力学入门, 科学出版社, 1983. 5
- [3] 规范编写组: 水利水电地下工程锚喷支护技术规范(送审稿), 1983. 10
- [4] 徐荣熙、杨子文等: 工程岩体因子组合分类, 水电工程研究, 1981. 12
- [5] 杨子文: 岩体软弱结构面的工程分级及其剪切参数估计, 水电工程研究, 1983. 6
- [6] 杨子文等: 根据弹性纵波速度定量评价岩体工程质量, 岩石力学, 1983. 8

(上接15页)

中型水电厂 1970~1980 年流动资金统计分析, 每千瓦流动资金的变幅为 1.2~14 元, 其平均值大致在 4~6 元, 《重评》采用的 30 元/千瓦偏大很多。

3. 工资、材料、其它费用等指标问题 《重评》一文在水电成本计算中采取的工资、材料、其他费用等项指标经折算为 4.69 元/千瓦。据有关规定大型水电站为 1.83 元/千瓦, 《重评》所引用的较有关规定高出 150% 左右。因篇幅所限, 其他数据不再一一讨论。

为了作好电源投资分配, 应该明确, 开发水电是同时完成了一次, 二次两部分能源的开发, 这是关键。只建火电厂仅是二次能源开发, 必须伴有作为一次能源的煤炭开采与运输相应规模的建设, 否则是无法与水电开发进行正确比较的。

我国水电能源的开发利用, 已大大落后于世界其他国家, 必须迅速赶上去, 确立大力发展战略思想, 尽可能多搞水电, 给水电以战略投资, 省下宝贵的矿物资源作更有益的贡献, 切不可再贻误时机了。