

DOI : 10.16285/j.rsm.2016.08.035

大型地下厂房块体稳定性简便分析方法

周扬一¹, 冯夏庭¹, 徐鼎平¹, 贺明武²

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2.中国长江三峡集团公司, 北京 100038)

摘 要:块体是结构控制型岩体中常见的潜在危险源之一。利用极限平衡法及强度折减法两种方法计算了某在建特大型水电站地下厂房开挖揭露的部分块体的安全系数,并根据计算结果提出一种利用块体几何及力学参数判断其稳定性的简便图解方法,经现场监测数据验证计算结果可靠性可满足工程要求。研究表明,对同一块体而言,极限平衡法和强度折减法得到的安全系数以及对其稳定性的总体判别结果并不一致。强度折减法受软件算法及网格尺寸影响,结果偏于保守。简单块体的安全系数计算应以极限平衡法为主,而复杂形态块体的安全系数用强度折减法计算较为方便。利用垂向地应力、块体体积、最大角点深度及结构面等效强度等 4 个指标并结合块体稳定性判别分区图,可满足快速判断块体稳定性的需要。对于判别为不稳定的块体,应及时支护并考虑加强支护。研究成果可用于类似工程块体稳定性的快速分析。

关键词:块体; 极限平衡法; 强度折减法; 安全系数; 稳定性判别

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2016) 08 - 2391 - 08

A simplified analysis method of block stability in large underground powerhouse

ZHOU Yang-yi¹, FENG Xia-ting¹, XU Ding-ping¹, HE Ming-wu²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: Blocks are one of potential failure modes appeared mainly in structurally-controlled rock mass. Factors of safety (FoS) for blocks identified in underground caverns of a huge hydropower station are obtained using the limit equilibrium method and strength reduction method. A simple graphical method for stability analysis based on block parameters is proposed by the calculated FoS of the block, and the reliability of results is validated by in-situ monitoring data. It is found that the FoS values obtained by these two methods are inconsistent even for the same block, which thus further influence the stability judgment. Results obtained by the strength reduction method are conservative since it is affected by software algorithm realization and mesh sizes. FoS of simple blocks (i.e. blocks consist of 3 joints and excavation boundary) can be easily obtained by the limit equilibrium method, while FoS of complex blocks (i.e. blocks consist of more than 3 joints and excavation boundary) are more conveniently calculated by the strength reduction method. Four block parameters, namely vertical in-situ stress, block volume, the maximum vertex depth, and equivalent joint shear strength, in combination with the stability partition chart, are applied to assist in the stability judgment. Once blocks are determined as unstable, the proper support and reinforcement measures should be adopted promptly. These findings can be used to other cases with similar unstable problems of blocks.

Keywords: block; limit equilibrium method; strength reduction method; factor of safety; stability judgment

1 引 言

岩石地下工程中,根据地应力与岩体结构组合可以将岩体划分为不同类型^[1],每种类型的岩体有其自身特定的破坏形式。结构控制型岩体是其中常

见的一类工程岩体。结构控制型岩体通常指中低地应力场中由 1~3 组结构面相互切割而成的岩体,这类岩体稳定性主要受结构面控制。结构控制型岩体中常见的破坏形式是块体垮落(顶拱)或滑落(边墙),见图 1。结构面几何参数的随机性^[2]使块体的

收稿日期: 2014-07-22

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No. 11232024); 国家自然科学基金国际合作重大项目(No. 41320104005)。

This work was supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China(11232024) and the International Cooperation Program of National Natural Science Foundation of China(41320104005)。

第一作者简介: 周扬一,男,1987年生,博士研究生,主要从事复杂条件下大型地下洞室群稳定性方面的研究工作。E-mail: zhouyangyi2007@163.com

位置、体积、形状等参数通常也是随机变量，这就为开挖于此类岩体中的地下工程稳定性分析带来不可预知的困难。这种困难还表现在常用的连续介质力学模型不适用于块体滑移、旋转等大变形分析。此外，由于控制性结构面位置的隐蔽性以及块体垮落的突然性，块体常常成为地下工程施工时的主要风险源。从块体开挖揭露到块体稳定性计算得到确定的结果通常需要一定时间，在这一时间段内若不及时采取措施，块体有可能发生失稳破坏。因此，对各种形态块体的稳定性进行快速判断对地下工程而言具有重要的实际意义。



(a) 已掉落块体



(b) 潜在块体

图 1 块体

Fig.1 In-situ blocks

块体稳定性分析通常包含以下几方面内容：运用几何学知识搜寻潜在块体^[3-5]、确定块体的几何参数^[6]与结构面强度参数^[7]、利用极限平衡法计算块体安全系数^[8-9]、块体的合理支护^[10]等。评价一个特定块体的稳定性时基本上按照上述步骤进行。首先是块体搜寻，由确定的优势节理组交切而成的块体搜寻与运动学分析可借由经典块体理论^[11]解决，而由随机结构面交切而成的随机块体识别方法可利用一般块体理论^[4]进行计算。块体参数的确定方法通常包括现场调查与计算机建模，如结构面产状测量^[12]、迹线测量、交切点位测量、结构面抗剪强度测定、方量与埋深估计等。根据已确定的块体参数由静力平衡方程得到块体的理论安全系数^[13]，最后根

据安全系数调整支护参数。目前，块体分析的复杂计算已经部分由相关软件实现，包括随机块体搜索^[4]、极限平衡计算^[14]、离散单元法计算^[15]等。这些软件的共同特点是根据提供的结构面参数（有时包括地应力场）能够便捷地计算出块体安全系数，并确定相应的支护参数，因而极大地简化了地下工程块体稳定性的分析判定流程。

块体极限平衡分析一般仅考虑极限状态，即块体被揭露后的瞬时状态，而忽略了开挖后围岩应力调整导致块体边界受力随之改变的过程。为了充分考虑这一过程，本文利用离散元软件对开挖后块体的力学行为进行全过程模拟，重点考察有初始地应力条件下的块体稳定性，并借助强度折减法计算块体安全系数。为了进行对比，对同一块体还利用极限平衡法计算其安全系数。最后通过对计算样本的统计分析，得到一种可用于判断块体稳定性的简便图解方法。

2 数据及计算方法

计算所用的块体参数资料全部来自某在建特大型水电站地下主厂房及主变室实测数据，块体基本信息见表 1。该水电站地下洞室群围岩主要为 II、III 类厚层灰岩、白云岩、大理岩等碳酸盐岩，岩石坚硬致密，强度高，层面为主要结构面。洞室群埋深一般在 200 ~ 500 m 之间，地应力以自重应力为主。块体安全系数计算采用 Rocscience 公司的 Unwedge 软件^[14]（版本 3.0，极限平衡原理）以及 Itasca 公司的 3DEC^[15]软件（版本 4.1，离散单元法）。Unwedge 建模时先由洞室剖面轮廓线扩展成三维洞室模型，然后根据输入的 3 组结构面产状数据进行随机块体搜索，得到洞室周边所有可能的块体组合，并由用户选择其中与现场出露位置一致的块体。Unwedge 还提供了根据结构面迹线长度对块体尺寸进行等比例缩放的功能以保证块体模型几何参数与实测值一致。Unwedge 根据结构面抗剪及抗拉强度参数计算安全系数，并提供了考虑初始地应力场影响的附加选项。3DEC 根据洞室坐标建立三维洞室模型，根据关键点坐标与结构面产状进行岩体分割，通过一定的调整使块体位置、形状、尺寸与现场近似一致。利用 3DEC 可进行不同边界条件及初始地应力的开挖模拟，通过块体变形趋势（设置变形监测点）判断块体稳定性，并可利用强度折减原理计算块体安全系数^[16]，计算时对黏聚力及摩擦系数同时进行折减。以编号为 YB22 的顶拱块体为例，建立的洞室及块体模型见图 2。

表 1 块体基本信息
Table 1 Basic information of block

编号	出露部位	关键点坐标	结构面特征	结构面抗剪强度	体积	块体角点最大深度
统一编号	洞室名称， 顶拱/侧拱/边墙	结构面交点三维坐标， 统一的局部坐标系	结构面编号，产状， 地质特征	黏聚力、内摩擦角 的地质推荐值	估算体积	估算的块体顶点到 临空面最大距离

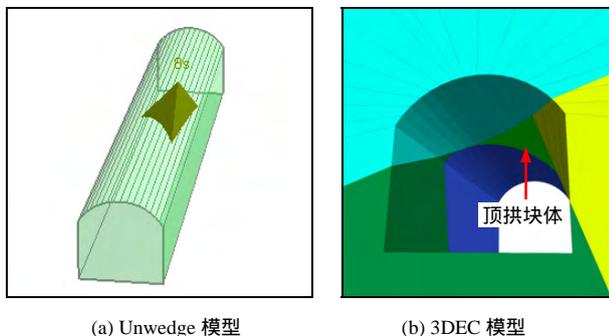


图 2 YB22 块体模型
Fig.2 Numerical models of YB22 block

考虑模型边界对计算结果的影响，3DEC 模型各边界到开挖面距离控制在 1.5 ~ 2.0 倍洞室跨度。这样处理既避免边界对计算结果产生显著影响，又能保证计算效率。结构面切割模型时设置结构面为完全贯通类型，中间不存在间断。模型初始竖向地应力场根据洞室上覆岩体实际厚度进行计算，并考虑应力梯度。根据现场地应力实测数据^[17]，水平小主应力与垂向应力之比一般小于 0.5，水平大主应力与垂向应力之比一般为 0.7 ~ 0.9，侧压力系数最小值为 0.5。遵循按不利情况分析的原则，侧压力系数统一取为 0.5。根据室内试验结果，将计算中采用的岩体基本物理力学参数列于表 2。强度准则方面完整岩石采用线性 Mohr-Coulomb 准则，结构面采用线性 Coulomb 准则。3DEC 模型的结构面抗剪强度参数是按文献^[17]中对各结构面地质特征的描述选取相应的地质建议值，不同地质特征的结构面抗剪强度参数列于表 3，各地质特征对应的现场照片见图 3。与原位直剪试验得到的结构面抗剪强度参数^[17]相比，块体稳定性计算采用的参数明显偏于保守。例如对于无充填的硬性结构面，原位直剪试验抗剪断黏聚力建议值为 100 ~ 200 kPa，抗剪断摩擦系数建议值为 0.7 ~ 0.8，而计算采用的黏聚力参数与摩擦系数分别为 50 ~ 60 kPa 和 0.7。

3 结果分析

3.1 极限平衡法与强度折减法结果对比

目前 Unwedge 软件只能对四面体形态（3 条结构面 + 临空面）的块体进行计算，暂时还无法处理 4 条及以上的结构面与临空面构成的复杂块体问

题。3DEC 块体构成不受结构面数量限制，但有时会出现由于块体过小造成网格无法划分的问题。从计算样本中选取 31 个四面体块体，利用两种方法计算同一块体安全系数并进行对比。其中有 8 个块体两种方法计算的安全系数均大于 2.0，其余 23 个块体的计算结果列于表 4。表中正常地应力指按上覆岩层厚度估算的地应力，低地应力指将正常地应力值降低 3 个数量级（即由 MPa 降为 kPa）后的地应力，Unwedge 计算时不考虑地应力影响。

计算结果表明，23 个块体中有 11 个块体结果基本一致（即安全系数相差不大，并且对块体是否稳定的判定结果一致，用粗体标示），其余 12 个块体结果不一致。值得注意的是在不一致结果中利用强度折减法得到的安全系数全部小于极限平衡法，其中按强度折减法计算有 5 个块体不稳定，而极限平衡法则全部判定为稳定。其余 7 个块体两种方法均判定为稳定，但安全系数相差较大。此外，由表 4 中块体几何信息可知，当两种方法对稳定性判别结果一致时，对应的块体方量及角点深度通常较大，即对于体积及角点深度较大（通常为 5 m 以上）的块体，两种计算方法更容易得到一致的结果，而对于小块体，两种方法的结果可能出现分歧。边坡工程中的安全系数计算结果表明^[18]，两种方法计算结果是否一致受结构面强度参数、网格尺寸、模型容差等因素影响，而深层原因主要是强度折减法受软件自身迭代算法及本构模型影响^[19]，在不要求计算精度及不考虑开挖扰动的前提下应优先采用极限平衡法进行计算。另一方面，考虑到强度折减法计算结果偏于保守，易为工程上接受，且复杂形状块体及开挖扰动环境目前只能用离散元软件进行模拟求解，为保证后续统计分析的一致性，计算结果以强度折减法为准。此外，对比强度折减法在两种地应力条件下的计算结果可知，地应力降低对块体稳定性有不利影响，这也与实际情况一致。

3.2 离散元强度折减法计算结果统计分析

利用 3DEC 软件的块体体积计算功能可获得块体体积，并将全部 64 个块体的基本信息绘制成统计直方图，见图 4。由图可知，竖向地应力集中在 8 ~ 11 MPa，与岩石强度相比属于中低应力。块体方量多集中在 600 m³ 以下，其中 200 m³ 以下的块体最

为常见。块体构成方面，“3+临空面”和“4+临空面”类型的块体基本各半。对于4条及以上结构面与临空面构成的块体，极限平衡法的计算过于繁琐^[3,13]，而利用离散元软件处理比较简洁而且直观。

表 2 岩体基本物理力学参数
Table 2 Physical and mechanical parameters of rock mass

岩体	密度 / (kg/m ³)	体积模量 / GPa	剪切模量 / GPa	黏聚力 / MPa	内摩擦角 / (°)	抗拉强度 / MPa	剪胀角 / (°)	法向刚度 / (GPa/m)	切向刚度 / (GPa/m)
完整岩石	2 740	16.7	10	8	45	1	5		
结构面				视情况而定	视情况而定	0	0	1	1

表 3 结构面地质特征与相应的抗剪强度参数
Table 3 Geological features and corresponding shear strength parameters of joints

编号	地质特征	黏聚力 / kPa	摩擦系数
特征 1	平直粗糙，方解石胶结	150	0.7
特征 2	平直粗糙，部分方解石胶结	90	0.7
特征 3	起伏粗糙，无充填	60	0.7
特征 4	起伏粗糙，附钙质薄膜	55	0.7
特征 5	平直粗糙，无充填（或附钙质薄膜）	50	0.7
特征 6	平直粗糙，附泥钙质，局部钙质薄膜	35	0.5
特征 7	平直粗糙（或起伏粗糙），附泥钙质（或泥质充填，泥夹碎屑物）	20~25	0.5~0.6
特征 8	平直粗糙，泥夹碎屑，部分泥钙质	25	0.25

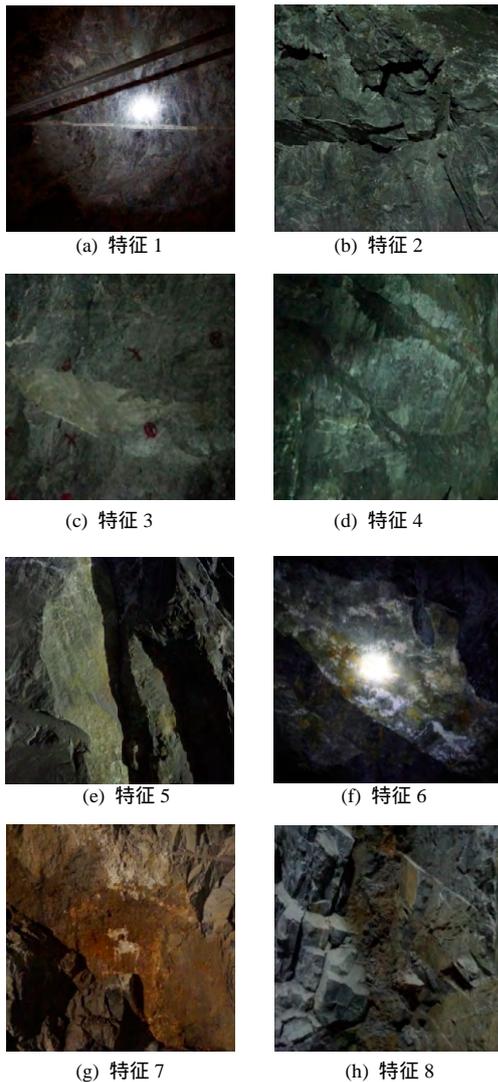


图 3 各地质特征的现场照片
Fig.3 Photos of various geological features

表 4 两种方法计算的块体安全系数
Table 4 Block factor of safety values calculated by two methods

块体编号	几何信息		Unwedge	3DEC	
	方量 / m ³	角点深度 / m		正常地应力	低地应力
YB22	279.3	7.2	0.963	1.1	<1.0
YB28	31.0	3.0	2.517	1.4	<1.0
YB29	18.8	3.1	2.244	1.4	<1.0
YB39	119.3	5.8	1.428	1.0	<1.0
YB48	74.7	4.9	2.978	1.2	1.0
YF4	44.8	4.4	0.781	<1.0	<1.0
YF35	109.3	6.5	1.339	1.3	<1.0
YF38	274.6	6.5	1.996	>2.0	
YF39	96.0	6.4	1.242	1.3	1.0
YF43	36.6	3.2	1.388	<1.0	<1.0
ZB10	145.6	5.3	1.891	>2.0	
ZB12	7.7	1.0	6.084	<1.0	
ZB13	42.0	4.2	3.760	1.5	
ZB16	45.0	3.5	2.885	<1.0	
ZB19	10.4	1.5	2.992	<1.0	
ZB22	34.6	5.3	1.995	>2.0	
ZB25	30.5	3.3	2.025	1.1	
ZB27	40.6	4.2	2.080	1.1	
ZB33	157.0	5.7	1.048	1.0	
ZB34	345.8	12.6	1.709	>2.0	
ZF29	88.0	4.3	1.995	1.5	
ZF30	106.6	4.6	1.583	<1.0	
ZF31	40.4	2.8	0.809	<1.0	

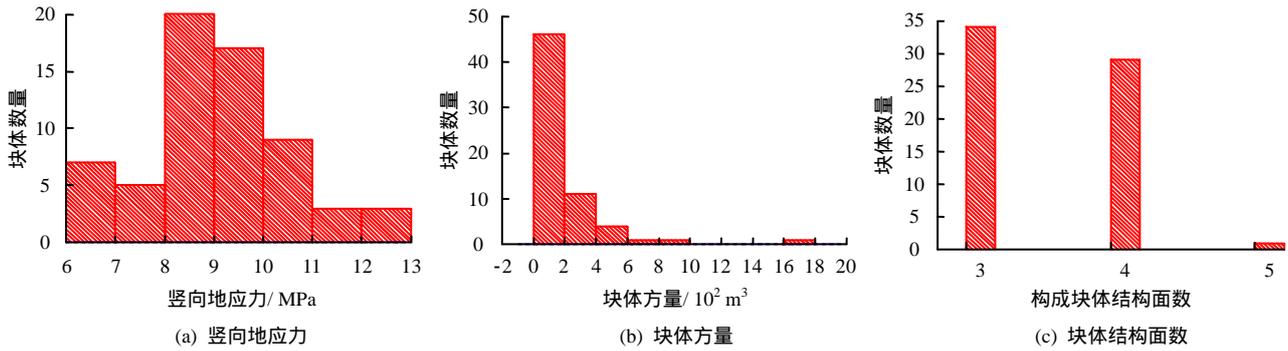


图 4 块体基本信息统计直方图
Fig.4 Histograms of basic parameters of blocks

影响块体安全系数的主要因素包括几何及力学因素两方面^[20-21]，前者包括块体体积、形状、出露位置及结构面产状、面积等，后者包括岩石重度、地应力场、地下水头、结构面强度（抗剪、抗拉）、爆破振动等。块体稳定性需综合考虑这两方面要素。考虑勘察与地质编录时获取数据的难易程度，选择块体体积（m³）、竖向地应力（MPa）、块体角点最大埋深（m）、无量纲平均节理强度等 4 个数据作为评价块体稳定性指标。其中无量纲平均节理强度为

$$S_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^N (c_j^i \mu_j^i)}{Nc \tan \varphi} \quad (1)$$

式中： S_{avg} 为平均节理强度； c_j^i 为构成块体第 i 条结构面的黏聚力； μ_j^i 为构成块体第 i 条结构面的摩擦系数； N 为块体结构面条数（不含临空面）； c 为完整岩石的黏聚力； φ 为完整岩石的内摩擦角。 c 与 c_j^i 单位应一致。

以块体体积为横坐标，其他 3 个数据的乘积为纵坐标绘制散点图，并按照块体稳定性及其安全系数进行分区，结果见图 5。图 5(a)表明，不稳定块体（安全系数<1.0）多数分布在分区 A 中，分区 B 中稳定块体数远多于不稳定块体，分区 C 中全部为

稳定块体。图 5(b)表明，分区 A+B（与图 5(a)分区相同）内的稳定块体安全系数多小于 2。考虑到参数的不确定性以及工程安全优先的原则，可将分区 A 视为块体不稳定区，分区 B 视为块体潜在不稳定区，分区 C 视为块体稳定区。

4 结果验证及应用

4.1 计算结果验证

本文研究所依托的某在建水电站地下洞室群设计规模巨大，其中主厂房设计跨度可达 30.5 m，高度近 90 m。受层面及长大节理、节理密集带、缓倾角节理等影响，开挖过程中揭露了大量的潜在不稳定块体，这些块体在后续开挖施工中受爆破扰动及应力调整影响，可能发生块体垮落、塌方及滑落等破坏现象。为了检验计算结果的有效性，以左、右岸主厂房及主变室第 I 层开挖揭露的部分块体为例，通过现场监测数据随时间的变化趋势反映其真实状态，并验证计算的合理性，块体详细信息见表 5，监测数据时程曲线见图 6。需要说明的是，由于支护及时以及支护强度很大，目前所有块体均未出现明显不稳定迹象。

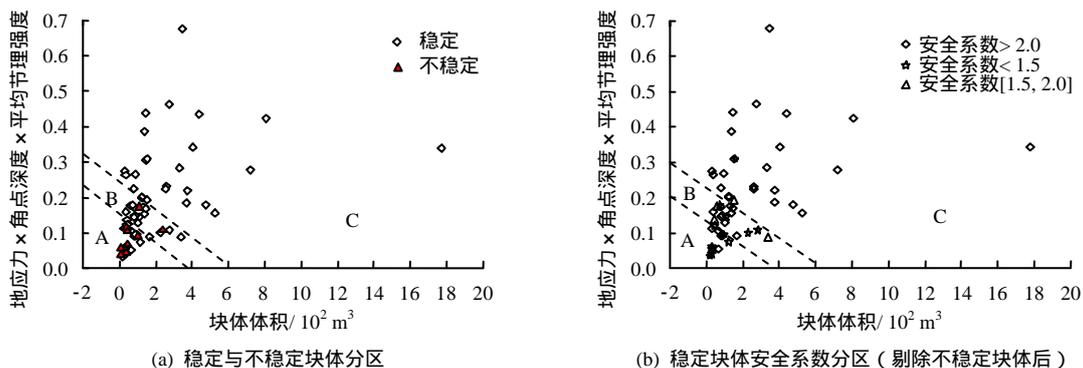


图 5 离散元强度折减法计算的安全系数统计

Fig.5 Factors of safety partition and related parameters by 3DEC simulation

表5 验证所用块体信息
Table 5 Block information for validation purpose

块体编号	出露位置	埋深 /m	方量 /m ³	安全系数 (无支护)	支护措施	监测项目
ZB8	左岸主变室顶拱	262	808.6	>2.0	系统锚杆+10 cm 钢纤维混凝土+挂网+4 束 2 000 kN 预应力锚索	孔口变形
YF50	右岸主厂房侧拱及边墙	323	1 776.0	>2.0	系统锚杆+15 cm 钢纤维混凝土+挂网+2 000 kN 预应力锚索	孔口变形
ZF31	左岸主厂房侧拱	352	40.4	<1.0	系统锚杆+15 cm 钢纤维混凝土+挂网+21 根 50 kN 张拉锚杆	锚杆应力
YF43	右岸主厂房侧拱及边墙	254	36.6	<1.0	系统锚杆+15 cm 钢纤维混凝土+挂网+2 000 kN 预应力锚索	锚杆应力
ZF29	左岸主厂房侧拱	330	88.0	1.5	系统锚杆+15 cm 钢纤维混凝土+挂网+3 束 1 500 kN 预应力锚索	锚索锚固力
YF26	右岸主厂房侧拱	373	340.0	1.6	系统锚杆+15 cm 钢纤维混凝土+挂网+4 束 1 500 kN 预应力锚索	锚索锚固力

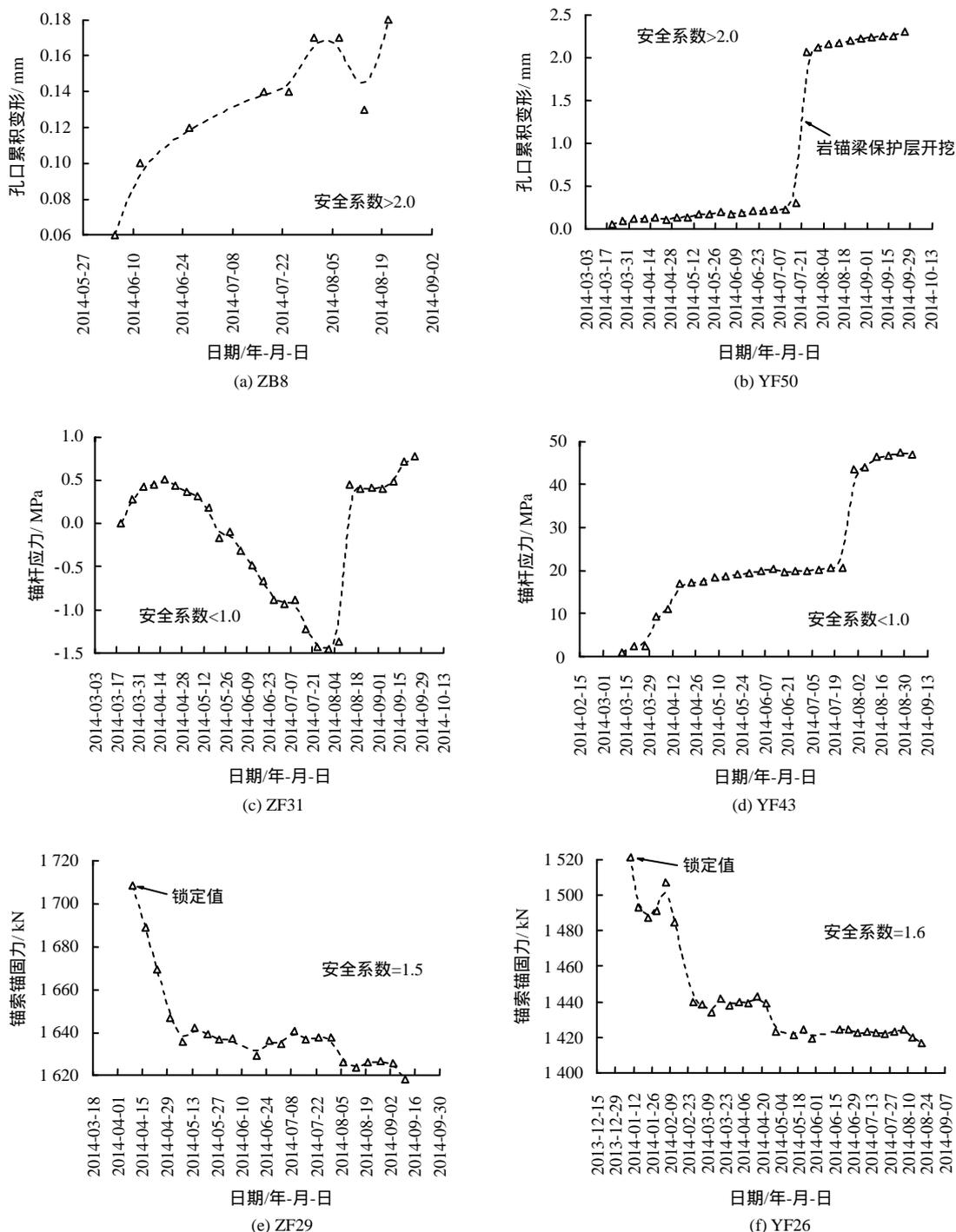


图6 块体监测时程曲线

Fig.6 Monitoring time-history curves of blocks

根据时程曲线的变化趋势可以确定这些块体目前是稳定的,其中 ZB8 向洞内的变形量不到 1 mm,而 YF50 受开挖爆破影响,变形突增约 2.5 mm,之后趋于稳定,这与计算结果一致。ZF31 锚杆应力值在 +1.0 ~ -1.5 MPa 之间波动,说明加强支护后(加密锚杆)块体未发生明显运动。YF43 的锚杆应力呈阶段式增长,说明即使在有支护条件下块体仍在缓慢运动,并明显受临近开挖影响,这也从一个侧面表明计算结果是合理的。锚索锚固力发生一定的损失之后变化趋于稳定,也表明计算结果基本正确。

4.2 计算结果应用

对于一个位置确定、各种参数完备的块体,可以利用图 7 进行块体稳定性的初步判别,尤其是对形状复杂的多面体块体。评价所需 4 个基本指标当中,块体体积、最大角点深度两个数据可以根据实测结构面产状和迹长通过计算机三维建模得出,竖向地应力可由块体上覆岩体厚度估算获得,结构面强度参数可由结构面地质特征参考地质推荐值得到,而完整岩石强度参数可通过常规三轴试验测定。考虑到上述参数均属于地质勘查工作应当提供的基础数据,因而相对容易获取。将计算得到的 X-Y 坐标代入分界线方程,判定该坐标所处分区。若在不稳定分区内,则需考虑对块体加强支护,若在潜在不稳定分区内,需对该块体的变形加密监测,并根据监测数据变化趋势采取相应工程措施,若在稳定分区内,则按既定方案进行支护。需要说明的是,文中计算块体稳定性的方法属于静力学范畴,因此不适用于爆破振动条件下的块体稳定性判别。

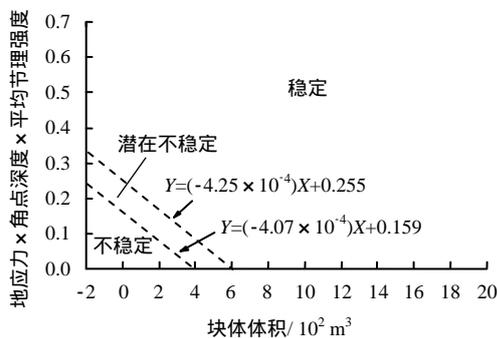


图 7 块体稳定性分区

Fig.7 Block stability partition

5 结论

(1) 针对同一个块体,极限平衡法和强度折减法计算得出的安全系数及对稳定性的判别结果并不一致。总体而言,强度折减法受软件算法及网格尺

寸影响较大,结果偏于保守。简单块体的安全系数计算应以极限平衡法为主,而复杂块体的安全系数用强度折减法计算较为方便。

(2) 根据强度折减法计算结果,利用竖向地应力、块体体积、最大角点深度、无量纲平均节理强度等 4 个指标,得到块体稳定性判别分区图。利用该图及勘察提供的块体数据,可对块体稳定性进行简单快速判定。对于判别为不稳定的块体,应及时支护及考虑加强支护。

(3) 现场监测数据(累积变形、支护受力)表明,块体揭露后的实际行为与计算结果指示的稳定程度较为一致,计算结果的合理性因此得到了验证。

致谢:此成果由中国长江三峡集团公司资助,特此致谢。

参考文献

- [1] HOEK E, BROWN E T. Underground excavations in rock[M]. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1980.
- [2] DERSHOWITZ W S, EINSTEIN H H. Characterizing rock joint geometry with joint system models[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 1988, 21(1): 21 - 51.
- [3] GOODMAN R E, SHI G. Block theory and its application to rock engineering[M]. New Jersey, USA: Prentice-Hall, Inc., 1985.
- [4] 于青春, 薛果夫, 陈德基. 裂隙岩体一般块体理论[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
YU Qing-chun, XUE Guo-fu, CHEN De-ji. General block theory for fractured rock mass[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007.
- [5] LU J. Systematic identification of polyhedral rock blocks with arbitrary joints and faults[J]. **Computers and Geotechnics**, 2002, 29(1): 49 - 72.
- [6] KALENCHUK K S, DIEDERICHS M S, MCKINNON S. Characterizing block geometry in jointed rockmasses[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2006, 43(8): 1212 - 1225.
- [7] INDRARATNA B, OLIVEIRA D A F, BROWN E T, et al. Effect of soil-filled joints on the stability of rock wedges formed in a tunnel roof[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2010, 47(5): 739 - 751.
- [8] LIU J, LI Z, ZHANG Z. Stability analysis of block in the

- surrounding rock mass of a large underground excavation[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2004, 19(1): 35 - 44.
- [9] ASADOLLAHI P, TONON F. Definition of factor of safety for rock blocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2010, 47(8): 1384 - 1390.
- [10] ORESTE P P, CRAVERO M. An analysis of the action of dowels on the stabilization of rock blocks on underground excavation walls[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2008, 41(6): 835 - 868.
- [11] 石根华. 岩体稳定分析的赤平投影方法[J]. **中国科学**, 1977, 5(3): 260 - 271.
SHI Gen-hua. Rock mass stability analysis based on stereographic projection method[J]. **Scientia Sinica**, 1977, 5(3): 260 - 271.
- [12] 孙玉科, 古迅. 赤平极射投影在岩体工程地质力学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
SUN Yu-ke, GU Xun. Application of the stereographic projection in rock engineering and geomechanics[M]. Beijing: Science Press, 1980.
- [13] WARBURTON P M. Vector stability analysis of an arbitrary polyhedral rock block with any number of free faces[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1981, 18(5): 415 - 427.
- [14] Rocscience Inc.. Unwedge. Version 3.0. User's Guide[M]. Toronto: Rocscience Inc., 2004.
- [15] Itasca Consulting Group, Inc.. 3DEC—three-dimensional distinct element code, Ver. 4.1 User's Manual[M]. Minneapolis: Itasca, 2008.
- [16] ZIENKIEWICZ O C, HUMPHESON C, LEWIS R W. Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics[J]. **Geotechnique**, 1975, 25(4): 671 - 689.
- [17] 钮新强, 石伯勋, 翁永红, 等. 金沙江乌东德水电站可行性研究报告[R]. 武汉: 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 2012.
NIU Xin-qiang, SHI Bo-xun, WENG Yong-hong, et al. Feasibility study report of the Jinsha river Wudongde hydropower station[R]. Wuhan: Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, 2012.
- [18] CHENG Y M, LANSIVAARA T, WEI W B. Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods[J]. **Computers and Geotechnics**, 2007, 34(3): 137 - 150.
- [19] 黄达. 大型地下洞室开挖围岩卸荷变形机理及其稳定性研究[博士学位论文 D]. 成都: 成都理工大学, 2007.
HUANG Da. Study on unloading deformation mechanism and stability of excavating surrounding rock mass of large underground caverns[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007.
- [20] 张瑞新, 李泽荃, 赵红泽, 等. 节理岩体关键块体稳定的概率分析[J]. **岩土力学**, 2014, 35(5): 1399 - 1405.
ZHANG Rui-xin, LI Ze-quan, ZHAO Hong-ze, et al. A probabilistic analysis of key block stability in jointed rock masses[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(5): 1399 - 1405.
- [21] 王晓明, 郑银河. 裂隙岩体表征单元体及尺寸效应研究进展[J]. **岩土力学**, 2015, 36(12): 3456 - 3464.
WANG Xiao-ming, ZHENG Yin-he. Review of advances in investigation of representative elementary volume and scale effect of fractured rock masses[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(12): 3456 - 3464.