

地下洞室围岩稳定性分析方法简述

邓声君, 陆晓敏, 黄晓阳

(河海大学工程力学系, 江苏南京 210098)

[摘要]随着可持续发展战略的提出,地下工程的开发和利用显得尤为重要。地下洞室围岩稳定性是整个工程中的关键问题,现今对地下洞室围岩稳定性研究的分析方法有很多,为了明确各种研究方法的优缺点以及适用范围,本文对现有地下洞室围岩稳定性分析方法进行了分类总结,用系统性的方法从定性、定量、可靠度等方面考虑,主要包括洞室的整体稳定性分析和洞室局部块体的稳定性分析,研究结果对地下洞室围岩稳定性设计及计算有重要的意义,最后对相关研究的现状和发展趋势做了简述。

[关键词] 地下洞室 围岩稳定性 分析方法

[中图分类号] U451+.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2013)03-0541-7

Deng Sheng-jun, Lu Xiao-min, Huang Xiao-yang. A brief summary of analysis methods for the stability of underground surrounding rock masses [J]. Geology and Exploration, 2013, 49(3): 0541-0547.

隧道及地下工程技术是一门综合性的应用学科,而且应用范围比较宽泛(翁家杰,1995;轩辕等,2002;许传华等,2003;鄢建华等,2003)。在交通、地下仓储、地下厂房、地下店铺及办公设施,以及采水、开矿、建筑物基础处理和国防建设方面都发挥着关键作用。我国是一个人口众多、资源相对贫乏的国家,尤其是可耕用的土地资源人均水平远低于世界平均水平。因此开发利用地下空间资源就显得非常重要。隧道及地下工程建设事业的发展有利于国土资源的充分开发利用,如果应用得当,还具有环保和节能的优势。与发达国家相比,我们在地下空间资源的开发利用方面还相差很远,在交通和能源建设方面对隧道及地下工程有着巨大的需求,隧道及地下工程有着广阔的市场前景。

地下洞室稳定性问题是一个复杂的非线性力学问题,通常伴随着非均匀性、非连续性变形和大位移等特点。影响围岩稳定性的因素主要有两大类:天然地质条件和工程因素(于学馥等,1980;崔玖江,2001;习小华,2003)。其中天然地质条件包括初始地应力场、地下水、地质构造、围岩结构;工程因素包括洞室的位置和方向、各洞室间的相对位置和洞室尺寸、洞室形状、开挖顺序、支护方式、开挖工艺等。

地下洞室的稳定性分析可以从定性、定量、可靠度等方面考虑,主要包括洞室的整体稳定性分析和洞室局部块体的稳定性分析。近年来,随着岩石力学理论和测试技术的发展,电子计算机技术和有限元方法的推广与应用,以及广大的科研工作者的不懈努力,不断涌现出新的研究方法,在研究岩体的构造和力学特性、地下工程围岩失稳机理和支护结构的受力机理、探讨新的设计理论和方法等方面取得了许多可喜的成果(王建宇,1990;冯紫良,1993;谢和平等,1999;任青文,2001),为围岩稳定性评价提供了更多的途径。但作为地下工程的根本问题之一的围岩稳定性分析,目前并没有形成统一的理论,对围岩稳定性的评价,大多仍停留在定性或经验性水平,主要是结合具体地质条件和工程情况要求,采用多种方法综合评价(赵振英,1991;杨于鸿等,1999;景诗庭,1995),所以有必要对目前地下洞室稳定分析方法进行总结,了解其优点和不足,从而有助于在工程实践中做出正确的判断。

1 地下洞室围岩稳定性的定性分析方法

地下洞室围岩稳定性的定性分析可分为整体稳定性分析和局部稳定性分析两个方面。洞室整体稳

[收稿日期] 2012-05-03; [修订日期] 2012-11-15; [责任编辑] 郝情情。

[第一作者] 邓声君(1987年-),男,硕士研究生,长期从事地下工程研究工作。E-mail:410131864@qq.com。

定性评价的方法主要有经验类比法和岩体结构分析法;局部稳定性分析方法主要有块体稳定性赤平投影分析法、实体比例投影分析法和块体结构的矢量解析方法。

1.1 经验类比法

主要包括有成因的历史分析法、工程地质类比法(张倬元等,1994;杨志法等,1997;葛华等,2006)、专家系统等方法,这些方法进行洞室稳定性分析与设计是一个定性的研究过程,其结论是一种比较客观的评价标准,同时也为定量分析提供了判定依据。

工程地质类比法是根据拟建地下洞室的工程地质条件、岩体特性和动态观测资料,结合具有类似条件的已建工程,从工程地质的角度对围岩的各种差异进行概括、简化和归纳,然后加以分类,从而结合工程特征定性地判断工程区岩体的稳定性,取得相应的资料进行稳定性计算。对围岩分类的基本要求是类别明确,便于使用,能够体现已有的工程经验和认识。目前已有 20 多种围岩分类法,常用的有 RQD 分类(Deere,1989)、RMR 分类(Ikeda,1920)、Q 系统分类(Barton,1974)、Z 系统分类(谷德振,1979)等,都是工程地质类比法在地下洞室稳定性评价的具体应用。这些分类系统可以对不同类型围岩直接定量地给出其山岩压力值以及支护衬砌的形式和厚度,对于工程隧洞实现地下工程(结构)设计标准化起到了重要的作用(谭云亮等,1999;康红普,1999;中华人民共和国水利部,2002)。

1.2 岩体结构分析法

岩体结构分析法的理论基础是赤平极射投影和实体比例投影。将赤平极射投影和实体比例投影相结合,既可以通过作图方法求得不稳定块体在岩体中的具体分布位置、几何形状、体积和重量,确定其滑动方向、滑动面及其面积;也可以进行空间共点力系的合成和分解,对结构体在自重力和工程力作用下的稳定性进行分析计算。由于该方法较其它分析法显得简单、直观,且易于在计算机实现,因此,在岩体工程中应用很广。

1.3 块体稳定性赤平投影分析

赤平(极射)投影是一种球面投影。利用这种投影方法可以很方便地表达空间线状或面状物体的方向和相互之间的角度关系,20 世纪 60 年代以后该方法才逐渐被引入工程地质研究领域用来解决岩体结构问题。早期主要应用于岩体结构面的统计和结构面的表达,后来陆续提出了结构体形态和结构

面组合关系的赤平投影分析。由于赤平投影图本身只表示物体的空间几何要素的方向、角距,而不表达它们之间的尺寸大小及具体位置,因此,在岩体结构和岩体稳定分析中,赤平投影法不能确定结构体规模的大小及其在工程中的具体出露部位,不能反映工程作用力和结构面的抗剪强度大小。

1.4 实体比例投影法

实体比例投影法是研究直线、平面以及由平面围成的块体在一定比例尺的平面图上构成影像的规律和作图的一种图解法。它应用正投影(垂直投影)的原理和方法,并与赤平投影相配合,根据野外填图或地质断面实测的结构面产状和分布位置,通过作图,求取结构面的组合交线、组合的平面,以及由组合的平面和直线围成的结构体的几何形状和规模、分布位置和方向等,用平面投影表示块体立体几何关系。实体比例投影法与赤平投影法相结合,可以通过作图方法求出结构体在工程岩体中的具体分布位置、它的几何形状、体积和重量;确定其滑动方向、滑动面及其面积;也可以进行空间共点力系的合成和分解,对结构体在自重力和工程力作用下的稳定性进行分析计算。

1.5 块体结构的矢量解析法

块体理论矢量运算是分析岩质边坡稳定性的有效方法。该方法计算结果准确,通过分析结构面的空间位置关系和相应块体的几何参数和物理参数,可准确的寻找目标块体和可能的滑动方向。这为岩质边坡的加固设计提供了可靠的依据。基于块体理论的某些假定,在工程应用中,可结合场地条件和岩体的自身变形等因素进行综合评价。

2 地下洞室围岩稳定性的定量分析方法

地下洞室围岩稳定性定量分析基于应力、变形、塑性区等具体特征数据,应用力学原理和方法对洞室围岩稳定性作出定量评价。适用于围岩整体稳定性评价的方法有:基于理论解的方法和基于数值解的方法。适用于围岩局部稳定性评价的方法主要有基于刚体极限平衡的 K 法。

2.1 基于理论解的稳定性评价方法(对均质圆形、椭圆形洞室)

当前应用解析法在求解有关洞室围岩稳定性问题时,通常采用弹性和弹塑性(也有粘弹性)两种方法进行,且均按平面问题的极坐标进行解答。首先,在研究洞室稳定性问题时,一般情况下,将围岩体假设为各向同性的连续性介质,且洞室的延伸要远远

大于洞室断面的尺寸,按平面应变问题进行考虑,同时假设洞室围岩处于静力状态,这样可以利用应力平衡及微分、变分学知识,推求一些形状比较规则的地下洞室(圆形、矩形、椭圆形等)的围岩二次应力及变形特征方程。

解析法虽然不能准确地描述围岩的失稳、破坏过程,但大致上仍能对成洞条件作出评价,对各种洞型方案及处理措施进行对比分析。另外,解析法具有精度高、分析速度快和宜于进行规律性研究等优点,所以在工程实践中仍不失为一种基本的围岩稳定分析方法。但在岩体的应力、应变超过峰值应力和极限应变,围岩进入全应力、应变曲线峰后段的刚体滑移和张裂状态时,解析法便不再适用了。另外,由于解析法在研究洞室稳定性问题时所作的种种假设,与工程实际中经常遇到的多孔、不均质及各向异性等相矛盾,所以,解析分析法可以解决的实际工程问题比较有限,但是通过对解析方法及其结果的分析,往往可以获得一些规律性的认识,这是非常重要和有益的。

2.2 基于数值解的稳定性评价方法

数值模拟方法在研究洞室围岩应力以及围岩变形和破坏的发展,进而定量评价围岩稳定性方面具有重要的作用。因为该方法不仅可以解决各种非均质、非线性、含有软弱结构面以及具有流变特性和复杂洞形的围岩应力-应变分析问题,而且,还可以模拟各种支护方案的有效性以及不同施工程序对围岩稳定性的影响等。常用的数值方法有以下几种:

(1) 有限单元法(FEM)

该方法是目前应用最广泛的数值分析方法。1966年,布莱克(W. Blake)最先应用FEM解决地下工程岩石力学问题。经过几十年的发展,有限元已经成为一种相当成熟的数值分析技术,可用于求解线弹性、弹塑性、粘弹塑性、粘塑性等问题,是地下工程岩体应力、应变分析最常用的方法。

该方法的优点是可以部分地考虑地下结构岩体的非均质、非连续特征,可以给出岩体的应力、变形大小和分布,并可近似地依据应力、应变规律去分析地下结构的变形破坏机制。为了模拟岩体中存在的断层、节理、裂隙等结构面,考虑其非连续性,可按结构面的特征采用不同的处理方法,可以避免将岩体视为刚体、过于简化边界条件的缺点,能够非常直观地模拟岩体的变形和破坏过程。其不足之处是:数据准备工作量大,原始数据易出错,不能保证某些物理量在整个区域内的连续性。

(2) 边界元法(BEM)

该方法又称为边界积分方程法,由英国学者Bribbia总结提出,并从20世纪60年代开始在工程计算中得到应用。该法只在求解区域的边界上进行离散化(剖分单元),把域内未知量化为边界未知量来求解,能使数值计算维数降低一维,二维问题可以用一维的单元,而三维问题可用二维的单元,这就使自由度数目大大减少。另外,由于基本解本身的奇异性特点,使得边界元法在解决奇异问题时计算精度高,应力和位移具有同样的精度。当仅需要知道物体内部个别点的解时,有限元仍不得不剖分整个物体才能确定个别点的解;而边界元则可以在已知边界上的解后,根据需要去求物体内部预知点的解,可以比有限元大大节省计算量和费用。

但是,边界元法最后形成的系数矩阵是非对称满阵,远比有限元刚度矩阵(带状稀疏阵)的结构复杂。对于面体比较大的薄壁结构等物体,边界元法就不如有限元优越了,而且边界元法对奇异边界难于处理。另外,边界元法对变系数、非线性等问题较难适应,且它的应用是基于所求解的方程有无基本解,因此限制了边界元法在更广泛领域的应用。

(3) 离散元法(DEM)

离散单元法是一种适用于模拟离散介质的数值方法。自1971年由Cundall提出的以来,这一方法在工程中的应用不断深入。该方法特别适用于节理岩体及其与锚杆(索)的应力分析。离散单元法的一个突出功能是它在反映块体之间接触面的滑移、分离与倾翻等大位移的同时,又能计算块体内部的变形与应力分布。因此任何一种岩体材料都可以引入到模型中,例如弹性、粘弹性或断裂等。采用该方法分析边坡及裂隙发育地区工程的坍方和支护等仍是十分有效的,但当岩体并未被结构面切割成块体的集合时,该方法就不太适合。

(4) 快速拉格朗日分析法(FLAC)

FLAC是连续介质快速拉格朗日差分分析方法(Fast Lagrangian Analysis of Continuum)的英文缩写,主要用于模拟由岩土体及其它材料组成的结构体在达到屈服极限后的变形破坏行为。FLAC基本原理类同于离散单元法,但它却能像有限元那样适用于多种材料模式与边界条件的非规则区域的连续问题求解。在求解过程中,FLAC又采用了离散元的动态松弛法,不需求解大型联立方程组,便于在微机上实现。该方法适合于模拟地质材料在达到强度极限或屈服极限时发生的破坏和塑性流动的力学

行为;适合于模拟地质材料的大变形、失稳、动力、流变、支护与加固、建造及开挖等问题;同时还可以模拟渗流场和温度场对岩土工程的影响。作为新型数值方法之一,FLAC 方法已与离散元法、不连续变形分析法和半解析元法 etc 一起,成为分析岩土力学问题强有力的工具,得到了广泛的应用。其缺点是同有限元方法一样,计算边界、单元网格的划分带有很大的随意性。

(5) 不连续变形分析法 (DDA)

不连续变形分析方法 DDA (Discontinuous Deformation Analysis) 是石根华博士首创的。DDA 方法是分析不连续变形的一种新的离散型数值计算方法。它兼具了有限元与离散元两种方法的部分优点,此法将每个块体作为一个单元,块体与块体间通过接触机构进行连接,通过分析单个块体或块体系统的动态平衡,求解块体的受力和运动。此法可以反映岩体连续和不连续的具体部位,考虑了变形的不连续性和时间因素,既可计算静力问题,又可计算动力问题,既可计算破坏前的小位移,也可计算破坏后的大位移。由于岩体种类繁多,性质复杂,计算时步的大小对结果影响较大,计算方法还有待提高。

2.3 基于刚体极限平衡的 K 法 (关键块体理论)

块体理论是由石根华博士提出,并于 20 世纪 80 年代初逐步完善起来的(任青文,1995;任青文等,1999)。该理论认为岩体被结构面切割成各种类型的空间镶嵌块体,在自然状况下,这些块体处于静力平衡状态。当进行工程开挖或施加新的荷载后,暴露在临空面上的某些块体就会首先失稳,接着产生连锁反应,造成其它块体的松动、滑移,进而影响整个工程的安全。而这类首先失稳的块体被称为“关键块体(keyblock)”。块体理论的目的就是通过搜索关键块体,并分析其稳定性来研究工程岩体的稳定性状和工程处理措施。在进行分析时,块体理论作了几点假设:① 结构面为平面;② 结构面贯穿所研究的结构体;③ 结构体为刚体;④ 结构体的运动方式为沿结构面平移。具体的分析方法有矢量运算法和作图法。其中,矢量运算是将空间的平面和力系以矢量表示,通过矢量运算给出分析结果,而作图法则是应用全空间赤平投影方法直接作图求解。

块体理论首先将结构面和开挖临空面看成空间平面,块体是由空间平面构成的几何凸体,将各种作用荷载看成空间向量,应用几何方法(拓扑学和集合论)详尽研究在各空间平面已知的条件下,岩

体内可构成多少种块体类型及其可动性,然后通过静力平衡计算,求出各类失稳块体的滑动力,为工程加固措施提供设计依据。构成块体的结构面产状和出露位置具有很大的随机性和隐蔽性,具体位置只有在揭露后通过及时的施工地质编录予以确定。据此,将块体分为定位块体、半定位块体与随机块体。定位块体是由已知岩体中结构面产状、出露位置和开挖面切割形成的。半定位块体是由已知岩体中结构面产状、出露位置(如断层,岩脉)和开挖面与随机分布的节理面切割形成的。随机块体是由地质勘探阶段位置不能确定的裂隙或裂隙面与岩体开挖面切割形成的。块体理论还是以刚体极限平衡理论为基础的评价方法,不能评价块体以及构成块体的结构面的变形,国内外学者又在利用有限元的方法来评价块体的稳定性。

3 可靠度、破坏概率稳定性分析方法

通过引进概率论、随机理论来评价洞室的稳定,避免了安全系数的绝对性,只要破坏概率在许可的范围内,达到人们可以接受的程度,即为稳定。

影响地下洞室围岩稳定性的因素主要为地层岩性及其产状、构造结构面组合形态、地应力状态以及水的赋存情况等,这些因素具有很大的不确定性。传统分析方法用一个笼统的安全系数来考虑众多不确定性的影响。虽然某些参数(如材料强度等)取值时也用数理统计方法找出其平均值或某个分位值,但未能考虑各参数的离散性对安全度的影响。数理统计和概率方法在结构设计中的成功应用,鼓励和启发了隧道工作者寻求用概率方法研究地下工程中各种不确定性并估计其影响。目前分析方法主要有随机有限元法、蒙特卡罗法(Monte-Carlo)和响应面法(Response Surface Method)(王思敬等,1984;李世辉,1991;牟瑞芳,1996)。虽然可靠度分析方法应用已很广泛,但是仍然受到一些岩土工作者的反对和质疑,原因在于岩土工程本身的机理比较复杂,有些问题还未充分认识。岩土工程概率分析方法还处于发展阶段,不少概念还很不明确,计算方法也不够简便。这些困难也促使一些岩土工作者潜心钻研,吸收建筑结构概率分析的成果,针对地下工程的特点开展专题研究,虽未完全解决技术上的关键,但也取得了许多可喜成果。研究表明,概率和可靠度分析方法对不确定性越严重的问题,越能显示其活力。

4 物理模型试验和现场监测方法

物理模拟必须遵循相似性原则,即无论是设计与原型相似的模型,或者将模型实验的结果推展到实际工程应力状态的判定,都必须按照相似性原则进行。但在实际工作中要想做到物理模拟的全面相似几乎是不可能的,也是不必要的,只要能满足研究所需要的主要特征,解决主要矛盾就可以了。也就是说,在设计相似模型时,抓住关键的几项相似性也就达到了解决实际问题的要求。

现场量测是新奥法的三大支柱之一。地下工程信息化施工主要是以现场量测为手段的一种设计、施工方法,这种方法的最大特点是可在施工时一边进行隧道围岩变形及受力状态的各种量测,一边把量测的结果反馈到设计、施工中,从而最终确定施工方法、开挖顺序和支护参数,使设计、施工更符合现场实际。对于地下工程稳定性的监测与预报是保证工程设计、施工科学合理和安全生产的重要措施。隧道新奥法施工技术就是把施工过程中的监测作为一条重要原则,通过监测分析对原设计参数进行优化,施工中坚持预探测、管超前、严注浆、小断面、短进尺、强(紧)支护、早封闭、勤量测的24字方针。

5 地下洞室围岩稳定性研究发展趋势

洞室围岩稳定性分析是多学科理论方法、专家经验、监测量与计算机技术综合集成的科学。洞室失稳是一个极其复杂的力学过程,在实际工程中更是受到了许多因素的影响。通常伴随着非均匀性、非连续性变形和大位移,是一个高度非线性问题(郑颖人等,1996;郑治,2001)。20世纪70年代以后发展起来的非线性理论,如分叉、分形、突变理论等正成为解决非线性问题的有力工具。

近年来,有关岩石破坏、失稳、突变的分叉与混沌研究,也为围岩失稳分析提供了新的理论方法。随着计算科学及相关学科的进一步发展,其理论计算结果将更具有实际意义。要对洞室围岩稳定性问题有比较全面、深入的认识,就必须依照实际情况,从专业的思维定势中解脱出来,用系统的方法加以研究。因此,在进行地下洞室稳定性判断时,必须参考既有洞室稳定性判据的实践经验,同时结合实际工程中各量测值随时间变化的规律,才能作出正确的判断。

[References]

- Barton N. 2002. Some new Q2 value correlations to assist in site characterization and tunnel design[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 39:185 - 216
- Cui Jiu-jiang. 2001. Present status existing problems and relevant solutions of construction technology of tunnel and underground engineering [J]. Construction Technique, 30(1):132 - 138 (in Chinese with English abstract)
- Deere D U. 1989. Rock quality designation (RQD) after 20 years[J]. U. S. Army Corps Engrs Contract Report, 89(1):289 - 295
- Diede M S, Kaiser P K. 1999. Tensile strength and abutment relaxation as failure control mechanism s as failure control mechanism s in underground excavations[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining sciences, 36: 325 - 331
- Feng Z L, Lew R W. 1987. Optimal estimation of in-situ ground stresses from displacement measurements, Int. J. Num. & Anal[J]. Methods in Geomechanics, 11(4):391 - 408
- Feng Z. L. and Yang Z. F. 1990. Backanalysis technique of ground media and its Convergence speed up, Proc. Int[J]. Symposium on Advances in Geological Eng., 12(4):428 - 437
- Feng Zi-liang. 1993. An approach to optimal shape design of underground cavern [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 15(3): 29 - 36 (in Chinese with English abstract)
- Ge Hua, Wang Guang-de, Shi Yu-chuan, Liu Han-chao. 2006. The applicability of the common surrounding rock mass classification methods in the deep buried tunnels[J]. Chinese Journal of Geological Hazards and Prevention, 13(2):37 - 40 (in Chinese with English abstract)
- Ikeda K A. 1970. Classification of conditions for tunneling [C]. Proc. 1st Congr. eng. Geology IAEG. Paris: [s: n], 1258 - 1265
- Jing Shi-ting. 1995. The advance of reliability research of underground structure [J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 15(3):29 - 36 (in Chinese with English abstract)
- Kang Hong-pu. 1999. FLAC Analysis on affecting factors to rock bolting in gateroads [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 18(5):497 - 502 (in Chinese with English abstract)
- Li Shi-hui. 1991. Analysis of tunnel surrounding rock stability system [M]. Beijing: China Railway Press:99 - 103 (in Chinese)
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. 2002. (SL279 - 2002) Specification for design of hydraulic tunnel[S]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press:563 - 602 (in Chinese)
- Mou Rui-fang. 1996. Discussion on surrounding stability of tunneling and its control lability [J]. Journal of The China Railway Society, 18(4):82 - 88 (in Chinese with English abstract)
- Owen D R J. 1980. Hint on Finite Elements in Plasticity: Theory and practice[M]. Pineridge Press Limited, U. K. 8(2):215 - 270
- Ren Qing-wen. 1995. Rigid body element method and its application in stability analysis of rock mass [J]. Journal of Hohai University, 3(1):32 - 38 (in Chinese with English abstract)
- Ren Qing-wen, Yu Tian-tang. 1999. Theory and calculating model of block element method [J]. Engineering Mechanics, 8(2):54 - 59

- (in Chinese with English abstract)
- Ren Qing-wen. 2001. The research progress of rock mass damage analysis method [J]. Journal of rock mechanics and engineering, 20 (supp 2): 1303 – 1309 (in Chinese with English abstract)
- Shao Guo-jian, Zhou Jian-shou, Zhang Qing. 2003. Research on analysis method and criterion of rockmass stability [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 22(5): 691 – 696 (in Chinese with English abstract)
- Sun Jun, Wang Si-jing. 2000. Rock mechanics and rock engineering in China; Developments and current state of the art [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 37: 447 – 465 (in Chinese with English abstract)
- Tan Yun-liang, Jiang Fu-xing, Fan Wei-lin. 1999. Simulation of bolting effect on the stability of jointed rock mass by dispersive element method [J]. Journal of Engineering Geology, 7(4): 361 – 365 (in Chinese with English abstract)
- Wang Jian-yu. 1990. Monitoring of tunnel engineering and information technology design principle [M]. Beijing: China Railway Press, 6(2): 32 – 37 (in Chinese)
- Wang Si-jing, Yang Zhi-fa, Liu Zhu-hua. 1984. Underground engineering rock mass stability analysis [M]. Beijing: Science Press: 34 – 56 (in Chinese)
- Wang Zhi-yin, Ling Yun-peng, Wang Si-jing. 2000. Numerical simulation of the geomechanical processes in rock engineering [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 37: 439 – 507 (in Chinese with English abstract)
- Weng Jia-Jie. 1995. Underground engineering [M]. Beijing: China Coal Industry Press: 167 – 186 (in Chinese)
- Xi Xiao-hua. 2003. Factors affecting the stability of surrounding rocks [J]. West-china Exploration Engineering, 17(5): 59 – 60 (in Chinese with English abstract)
- Xie He-ping, Zhou Hong-wei, Wang jin-an, Li Long-zhong, M. A. K wasniewski. 1999. Application of FLAC to predict ground surface displacements due to coal extraction and its comparative analysis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 18(4): 397 – 401 (in Chinese with English abstract)
- Xu Chuan-hua, Ren Qing-wen, Li Rui. 2003. Advances in researching the stability analysis methods of the surrounding rock mass in underground engineering [J]. Metal Mine, 13(2): 87 – 93 (in Chinese with English abstract)
- Xuan Yuan, Xiao wen. 2002. The general situation of understructure work in China at the initial stage of 21 Century [J]. Construction Technology, 31(1): 31 – 34 (in Chinese with English abstract)
- Yan Jian-hua, Tang Lei. 2003. Current status and tendency of analyzing methods for stability of rock mass surrounding underground hydraulic work [J]. Rock and Soil Mechanics, 12(10): 58 – 62 (in Chinese with English abstract)
- Yang Zhi-fa, Shang Yan-jun, Liu Ying. 1997. Study on the analogism in geotechnical engineering [J]. Journal of Engineering Geology, 5(4): 299 – 305 (in Chinese with English abstract)
- Yang Yu-hong, Tang Chun-an, Zheng Yu-tian, Rui Yong-qin. 1999. Application of the FLAC to distortion father project of fu shun west open cast side slopes [J]. Journal of Geological Hazards and Environment preservation, 10(3): 6 – 11 (in Chinese with English abstract)
- Yu Xue-fu, Zheng Ying-ren, Liu Huai-Heng. 1980. The stability analysis of surrounding rock of underground engineering [M]. Beijing: Coal Industry Press: 128 – 134 (in Chinese)
- Zhao Zhen-ying. 1991. Numerical analysis and model study of jointed rock masses [J]. Journal of rock mechanics and engineering, 10(1): 55 – 62 (in Chinese with English abstract)
- Zhen Yin-ren, Liu Xing-hua. 1996. Modern non-linear science and rock mechanics problems [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 4(1): 98 – 100 (in Chinese with English abstract)
- Zhen Zhi. 2001. Retrospect and prospect hydraulic underground engineering [J]. Guizhou Water Power, 15(3): 29 – 30 (in Chinese with English abstract)
- Zhuo Zhang-yuan, Wang Shi-day, Wang Lan-sheng. 1994. Engineering geological analysis principle [M]. Beijing: Geological Publishing House: 383 – 428 (in Chinese)
- [附中文参考文献]
- 崔玖江. 2001. 隧道与地下工程施工技术现状及问题对策 [J]. 施工技术, 30(1): 132 – 138
- 冯紫良. 1993. 地下洞室形状设计优化的一个方法 [J]. 岩土工程学报, 15(3): 29 – 36
- 景诗庭. 1995. 地下结构可靠度分析研究之进展 [J]. 石家庄铁道学院报, 8(2): 13 – 18
- 康红普. 1999. 回采巷道锚杆支护影响因素的 FLAC 分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 18(5): 497 – 502
- 李世辉. 1991. 隧道围岩稳定系统分析 [M]. 北京: 中国铁道出版社: 99 – 103
- 牟瑞芳. 1996. 论隧洞工程围岩稳定及其可控制性 [J]. 铁道学报, 18(4): 82 – 88
- 任青文. 1995. 块体单元法及其在岩体稳定分析中的应用 [J]. 河海大学学报, 3(1): 32 – 38
- 任青文, 余天堂. 1999. 块体单元法的理论和计算模型 [J]. 工程力学, 8(2): 54 – 59
- 任青文. 2001. 岩体破坏分析方法的研究进展 [J]. 岩石力学与工程学报, 20(增2): 1303 – 1309
- 谭云亮, 姜福云, 范炜林, 徐恩虎, 刘传孝. 1999. 锚杆对节理围岩稳定性影响的离散元研究 [J]. 工程地质学报, 8(4): 361 – 365
- 王思敬, 杨志法, 刘竹华. 1984. 地下工程岩体稳定分析 [M]. 北京: 科学出版社: 34 – 56
- 王建宇. 1990. 隧道工程监测和信息化设计原理 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 6(2): 32 – 37
- 翁家杰. 1995. 地下工程 [M]. 北京: 煤炭工业出版社: 167 – 186
- 葛华, 王广德, 石豫川, 寇佳伟, 单冶钢, 周春宏. 2006. 常用围岩分类方法对某深埋隧洞适用性分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 13(2): 37 – 40
- 谢和平, 周宏伟, 王金安, 李隆忠, M. A. K wasniewski. 1999. FLAC 在煤矿开采沉降预测中的应用及对比分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 18(4): 397 – 401
- 轩轹, 啸雯. 2002. 21 世纪初中国地下工程概况 [J]. 施工技术, 31(1): 31 – 34
- 习小华. 2003. 分析影响隧道围岩稳定性因素 [J]. 西部探矿工程, 17

(5):59 – 60

许传华,任青文,李 瑞.2003. 地下工程围岩稳定性分析方法研究进展[J]. 金属矿山,13(2):87 – 93

于学馥,郑颖人,刘怀恒.1980. 地下工程围岩稳定分析[M]. 北京:煤炭工业出版社:128 – 134

杨志法,尚彦军,刘 英.1997. 关于岩土工程类比法的研究[J]. 工程地质学报,5(4):299 – 305

杨于鸿,唐春安,郑雨天,芮勇勤,江智明,马新民,霍起元.1999. FLAC 程序在抚顺西露天矿边坡变形治理工程中的应用[J]. 地质灾害与环境保护,10(3):6 – 11

鄢建华,汤 雷.2003. 水工地下工程围岩稳定性分析方法现状与发

展[J]. 岩土力学,12(10):58 – 62

赵震英.1991. 节理岩体数值分析及模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,10(1):55 – 62

张俾元,王士天,王兰生.1994 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社:383 – 428

郑颖人,刘兴华.1996. 近代非线性科学与岩石力学问题[J]. 岩土工程学报,4(1):98 – 100

郑 治.2001. 水工地下工程回顾与展望[J]. 贵州水力发电,15(3):29 – 31

中华人民共和国水利部.2002. (SL279 – 2002) 水工隧洞设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社:563 – 602

A Brief Summary of Analysis Methods for the Stability of Underground Surrounding Rock Masses

DENG Sheng-jun, LU Xiao-min, HUANG Xiao-yang

(Department of Mechanics, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098)

Abstract: With the proposal of sustainable development strategy, the development and application of underground engineering have become increasingly important. Throughout the whole engineering process, the stability of surrounding rock of underground cavity plays a vital role. Till now, a variety of analytical methods have been suggested for the study of the stability of surrounding rock. In order to clarify the merits and demerits as well as the application scope of each analytical method, this paper classifies and summarizes the existing analytical methods for the stability of the underground surrounding rock masses. Furthermore, based on a systematic approach, from the perspectives of quality, quantity and stability, this paper focuses on the analysis of the overall stability and the stability of partial rock-block of the cavity. The result will shed light on the design and calculation for the stability of surrounding rock of underground cavity. At last, this paper makes a summary of the present research status and analyzes the development trend of this field.

Key words: underground chamber, surrounding rock stability, analytical method