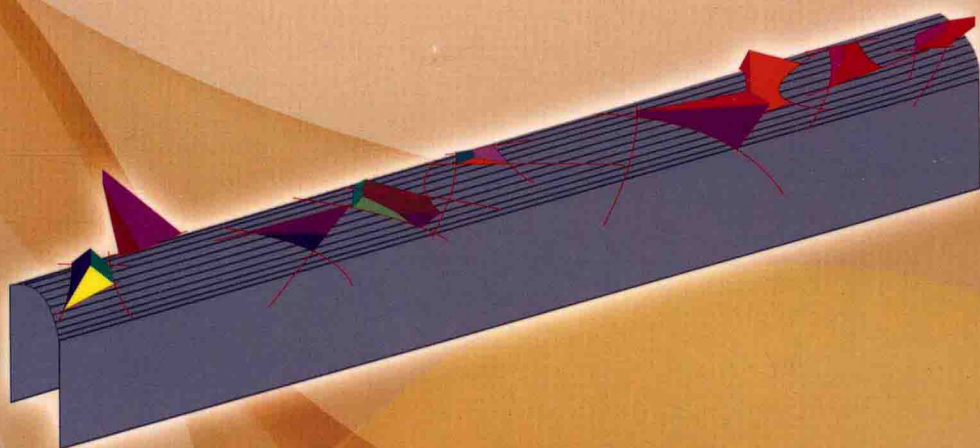


国家自然科学基金资助研究

三峡工程

地下电站厂房岩石块体研究

夏露 李茂华 陈又华 于青春 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

国家自然科学基金资助研究
中央高校基本科研业务费资助研究

三 峡 工 程

地下电站厂房岩石块体研究

夏露 李茂华 陈又华 于青春 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书研究以三峡右岸地下电站开挖为工程背景,以一般块体理论为理论基础,采用块体分析软件 GeneralBlock,建立了地下厂房三维岩石块体模型,对三峡工程地下电站洞室顶拱和尾水渠边坡的岩石进行块体识别和稳定性分析。本书内容为:第1章概括性地描述了研究的背景、内容和意义;第2章介绍了本书采用的理论和在此基础上开发的软件;第3章分析了三峡工程地下电站的工程概况,对地下电站洞室顶拱和尾水渠边坡的岩石块体进行块体识别和稳定性分析;第4章量化了三峡地下电站厂房岩体可以被视为孤立块体体系的程度。

本书可作为大专院校水利工程、水文地质和水环境专业的师生学习的参考书,也可作为有关科技工作人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

三峡工程地下电站厂房岩石块体研究 / 夏露等著

. -- 北京:中国水利水电出版社,2015.8

ISBN 978-7-5170-3760-6

I. ①三… II. ①夏… III. ①三峡水利工程—地下水电站—水电站厂房—岩石—建筑材料—研究 IV.

①TV731.6②TV4

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第250585号

书 名	三峡工程地下电站厂房岩石块体研究
作 者	夏露 李茂华 陈又华 于青春 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	184mm×260mm 16开本 7印张 115千字
版 次	2015年8月第1版 2015年8月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	30.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

序

举世瞩目的三峡工程为许多学科理论提供了发展和应用的舞台。这些学科包括本书作者们多年苦心钻研的岩石力学块体理论。

三峡工程地下厂房硐室的跨度、高度、长度和装机容量居当时世界前列，双线五级连续船闸的岩石高陡边坡的规模居世界之首。工程区的花岗岩经历了八亿多年地壳运动的作用，被无数不同方向和尺度的断层、裂隙等不连续面切割，在厂房硐室顶拱、高边墙及船闸直立坡中形成大小、形状不一的岩石块体，大者达数万立方米。在工程开挖过程中，这些块体如不超前预测和及时处理，就可能变形、失稳甚至突然塌落，无论在电站施工期或运营期，都将酿成难以想象的灾难。

但是，块体的超前预测和分析是工程界存在已久的难题。这项工作包括：如何根据有限的结构面统计几何数据预测尚未揭露的硐室边界上不稳定块体的形状、大小和数量，估算开挖面的安全性和支护工程量（特别是锚索、锚杆的长度、间距、长度和抗拉力），优化开挖和支护方案，最后在施工动态过程中，根据已部分揭露出来的结构面实测数据快速准确地识别不稳定块体，确定其空间位置、几何形状和规模，提出合理的支护方案。正是由于作者此项研究的意义，三次得到国家自然科学基金资助。这一问题在作者多年的努力下得到了较好的解决。

涉及岩体的问题，无论理论分析还是实际工程，都需要确定将岩体视为连续介质还是孤立块体体系，这两者有着很大区别。有些模型把岩体处理成连续介质，有些模型把岩体处理成块体集合体。岩体是否以及在多大程度上可被看作是块体集合体，这不

仅是一个模型处理方法的问题，也是一个涉及对岩体本质特征认识的基础问题。在本书中，作者提出了块体化程度的概念，为岩体在多大程度上可以被看作“块体的集合体”问题提供定量依据。作者依据国际岩石力学协会对裂隙间距和延展性的分级构造了 35 种“理想”岩体进行块体化程度计算，与三峡地下电站厂房实际岩体的块体化程度进行对比分析，两者结果相一致。岩体块体化程度的概念对今后各种岩体结构完整性的预测有很好的指导意义，能为量化各工程研究区岩体整体质量提供参考。在研究三峡坝区岩体的过程中，作者们研制开发了 GeneralBlock 软件。这是一个非常优秀的软件，集块体识别、稳定分析、加固辅助设计功能于一体，既可以对岩体裂隙进行随机模拟，然后进行随机块体分析，也可以在裂隙已知的条件下进行确定性块体分析。这一软件在处理三峡工程右岸地下电站厂房围岩块体时发挥了很好的作用。相信作者的研究成果会得到越来越广泛的应用。

薛果夫

2015 年 4 月 24 日于北京

前 言

三峡工程坝区岩体为坚硬的花岗岩，坝区主要建筑物的围岩的整体稳定性很少遭到质疑，但岩体局部稳定性一直是工程技术人员非常关心的问题。作者们在三峡工作期间，一直致力于岩石块体的理论和实际研究，并将两者相结合，为各工程研究区岩体整体质量提供参考。

本书的研究以三峡右岸地下电站开挖为工程背景，以一般块体理论为理论基础，采用块体分析软件 GeneralBlock，建立地下厂房三维岩石块体模型，对三峡工程地下电站硐室顶拱和尾水渠边坡的岩石进行块体识别和稳定性分析。根据块体识别和分析结果，并考虑各块体内的组合形式，设计、施工了相应的预应力锚索或锚杆加固处理，对锚杆、锚索和块体进行了系统的监测。监测结果表明，块体变形控制在 2mm 以内，锚杆应力和锚索应力损失率保持稳定，锚固效果良好。

书中分析了三峡地下电站厂房岩体的块体化程度，计算了地下电站厂房岩体可以看作孤立块体体系的程度。根据三峡地下电站厂房岩体的实测裂隙，通过逆建模方法建立了地下电站主厂房的三维裂隙网络模型，并进行了块体识别及分析。结果表明地下电站主厂房围岩的块体化程度为 4‰，岩体的整体质量非常好，块体在岩体中只是偶然现象，块体的总体积在整个岩体中只占很小的比例，岩体呈连续介质状态，围岩的稳定性较好。地下电站厂房开挖施工的实际情况印证了这一结论，开挖过程中发现，由随机裂隙形成的块体是很少的。

根据国际岩石力学学会对裂隙密度和延展性的分级，把裂隙

岩体分为 35 种。对这 35 种理想岩体进行块体分析，计算了这 35 种岩体的块体化程度，并对每种结构的每个研究范围进行了多次随机实现。详细讨论了这 35 种岩体结构的块体化程度随着模型范围变化的波动情况，从块体化程度的角度对表征单元体的尺寸进行了讨论。结果表明表征单元体的尺寸在 4~12 倍间距之间，不超过 12 倍间距。

35 种理想岩体结构的块体化程度计算表明，中等长度很宽间距裂隙岩体的块体化程度很低。而三峡地下电站主厂房围岩裂隙为中等长度很宽间距，计算表明其块体化程度接近于 4‰，二者的计算结论相一致。

本书中展现给读者的是作者们在这几年来，对三峡工程地下电站厂房岩石块体的研究。本书第 1 章概括性地描述了研究的背景、内容和意义。第 2 章介绍了本书采用的理论和在此基础上开发的软件。第 3 章分析了三峡工程地下电站的工程概况，对地下电站洞室顶拱和尾水渠边坡的岩石块体进行块体识别和稳定性分析。第 4 章量化了三峡地下电站厂房岩体可以被视为孤立块体体系的程度。

本书的研究工作，得到了长江水利委员会三峡地质大队赵克全主任、王德阳主任、周小毛工程师、张建兵工程师等的关心与帮助，得到满作武院长的宝贵意见，得到岩体裂隙课题组王晓明、刘晓非、郑银河、张成等博士的大力支持。在此表示衷心感谢！

由于作者水平有限，书中不足与错误之处在所难免，恳请各位读者批评指正，在此表示诚挚的谢意！

作 者

2014 年 12 月

目 录

序

前言

第 1 章 研究概况	(1)
第 2 章 岩石块体识别及稳定性分析理论	(6)
2.1 块体理论研究进展	(6)
2.2 一般块体方法	(9)
2.2.1 研究区域离散	(10)
2.2.2 裂隙筛选	(13)
2.2.3 块体识别过程	(14)
2.2.4 块体稳定性分析	(16)
2.3 GeneralBlock 软件	(19)
第 3 章 地下厂房岩石块体研究	(21)
3.1 地下电站工程概况	(21)
3.2 基本工程地质条件	(27)
3.2.1 地形地貌	(27)
3.2.2 地层岩性	(27)
3.2.3 地质构造	(29)
3.3 岩体结构及围岩类别	(34)
3.4 地下电站典型块体	(38)
3.4.1 主厂房顶拱块体	(38)
3.4.2 尾水渠边坡块体	(57)

第 4 章 地下厂房围岩块体化程度 (63)

4.1 不同裂隙岩体的块体化程度 (63)

4.1.1 形成岩石块体的裂隙 (63)

4.1.2 块体百分比 (67)

4.1.3 35 种裂隙岩体 (68)

4.1.4 各种岩体的块体化程度 (70)

4.2 基于块体化程度的表征单元体 (79)

4.2.1 表征单元体的概念 (79)

4.2.2 各种岩体 *REV* 的确定 (81)

4.3 地下电站主厂房围岩裂隙三维模型 (84)

4.3.1 裂隙网络模拟过程 (84)

4.3.2 裂隙的空间位置 (85)

4.3.3 裂隙的分组和方向性 (86)

4.3.4 裂隙迹线长度分布 (88)

4.3.5 三维不连续裂隙网络的建立 (88)

4.4 地下电站主厂房围岩块体化程度 (93)

4.4.1 围岩块体化程度的计算 (93)

4.4.2 围岩块体化程度的比较与分析 (96)

参考文献 (98)

第 1 章 研究概况

我国幅员辽阔，地质条件错综复杂，尤其是埋藏于地下的结构，我们不可能完全认识其特性，因此在设计、施工过程中有着很大的困难。过去，在地下工程中遇到岩石工程问题，多凭经验解决。但是随着工程条件的日益复杂性，单凭经验越来越难以解决实际问题。随着我国经济的高速发展，一些水利、交通、能源等工程建设规模逐渐扩大，岩石工程问题，如边坡、坝基、地下硐室等工程岩体的稳定性研究越来越受到重视。深入研究岩体稳定性，分析岩体结构完整性，已迫切成为岩石力学研究的重要课题，具有重要的工程意义及社会发展意义。

地质工程中各种岩体如边坡、坝基、地下硐室等，被结构面切割形成各种类型的空间镶嵌块体，在天然状态下，这些块体处于静力平衡状态。当进行边坡、地下硐室等人工开挖，或对岩体施加新的荷载时，岩体中存在的不连续面与施工开挖面形成不同规模的岩石块体，失去原有的静力平衡状态。这些块体可能失稳或垮落，甚至产生连锁反应，既破坏围岩的完整性和整个岩体工程稳定性，也对施工及其后的工程运营过程中造成灾害。因而研究这些块体的形成破坏机制及加固处理措施是有必要的。

三峡工程是当今世界最大的水利枢纽工程，许多方面突破了水利工程的世界纪录。工程于 1993 年开始施工准备，1994 年底正式开工（薛果夫，2008）。开工以来，工程生产中的安全问题一直受到国内科研人员与工程技术人员的高度重视。一旦在大跨度的地下硐室等地下结构发生冒顶、垮塌恶性事故，后果将极其严重，因此，块体的稳定性研究一直是三峡工程中的重要课题。坝区岩体为坚硬的花岗岩，坝区主要建筑物如船闸和地下发电厂房等大型岩体建筑物的围岩的整体稳定性很少遭到质疑。但岩体局部稳定性一直是工程技术人员非常关心的问题。设计阶段如何根据已掌握的裂隙数据对施工过程中可能出现的不稳定岩石块体的数量、规模、形状等进行预测，对不同开挖面的安全性及支护工程的工作量，如所需锚杆和锚索的长度、数量

等进行估算,进一步优化开挖和锚固支护设计方案;施工过程中如何根据实测的裂隙快速准确地识别出不稳定块体,确定块体的空间位置、几何形状和规模从而进行及时合理的支护是三峡工程中的难题之一(刘晓非,2009)。

三峡工程中永久船闸和地下电站厂房岩体开挖规模之大乃世界罕见,开挖过程中需要锚固的不稳定岩石块体数量非常大。图 1.1 显示了船闸施工开挖时的情景,三峡工程永久船闸为双线五级船闸,施工中开挖形成的边坡,长度达到 1700m 以上,最大高度超过 130m。图 1.2 显示了船闸开挖过程中发生某一巨型块体的垮落,块体体积为 1000m^3 ,垮落块体高程为 92~120m,对施工造成了很大的影响。图 1.3 显示了地下电站洞室跨度大、边墙高,形成的临空边界宽大,易出现较大规模的块体。因此,在地下洞室等地下工程研究中,块体稳定性分析是研究地下工程围岩整体稳定性研究的一项重要内容,有关三峡地下电站岩石块体的研究在工程中一直受到格外重视。



图 1.1 三峡工程永久船闸开挖施工现场



图 1.2 船闸开挖过程中的一处块体垮落



图 1.3 三峡工程地下电站硐室

工程开挖至今,国内不少学者对三峡工程边坡整体的稳定性、变形和局部稳定问题作了深入分析与评价。石安池等(1996)概括地论述了三峡水利枢纽工程永久船闸高边坡岩体地质条件、边坡一期开挖后的破坏块体及其分布规律,边坡岩体松弛特征,并以此为基础对边坡块体破坏机制和加固措施作了分析;张子新等(1998)把随机概率模型引入分形块体理论,研究了三峡高边坡关键分形块体的滑落概率和分形块体的大小及其分布密度,为三峡高边坡加固提供了理论依据;邹俊(2000)具体介绍了三峡永久船闸边坡不稳定块体的支护措施;殷跃平(2005)系统研究了三峡库区边坡结构类型,并对典型边坡开挖前后变形破坏过程进行了研究。

2004 年底,三峡地下电站土建工程开工。不少学者对三峡地下电站块体稳定性进行了研究。肖诗荣等(2000)对地下厂房下游边墙存在的四个大型块体采用刚体极限平衡方法进行了分析计算;黄正加等(2001)应用块体理论对三峡地下厂房围岩裂隙随机块体及大型断层定位和三峡船闸高边坡块体进行了分析;盛谦等(2002)应用块体理论、正交设计方法对三峡地下厂房围岩中可能形成的随机块体类型、几何特征与稳定性进行了分析;王家祥(2007)结合关键块体理论及立体几何学基本理论,从块体空间几何构成结合变形破坏方式,将三峡地下电站主厂房洞室顶拱块体模式归纳为 3 种基本模式共 12 种典型的基本单体和组合块体模型,并总结出块体加固的基本对策。

综合以上研究背景和国内科研人员与工程技术人员的研究现状分析,本书将以一般块体方法为理论基础,通过 GeneralBlock 软件(Xia 等,2015;Zheng 等,2015),建立地下厂房三维岩石模型(夏露,2011),对三峡工程地下电站洞室顶拱和尾水渠边坡的岩石进行块体识别和稳定性分析,并从块体化程度的角度(夏露,2010;Xia 等,2015)对三峡地下电站厂房岩体的完整性进行系统分析,得出三峡地下电站岩体块体化程度。在模型建立的过程中,模型范围选取引入了岩体表征单元体这一基本问题,提出了用岩体块体百分比确定岩体 REV 的方法,对各种岩体的 REV 进行了讨论。

本书的主要研究内容及总体思路如下:

第 1 章,从三峡工程右岸地下电站厂房的实际工程现状出发,引出块体稳定性研究的重要性和必要性;介绍了目前国内三峡工程岩石块体的研究现状;提出本书的主要内容是三峡工程地下厂房岩石块体的研究。

第2章,介绍了块体理论的产生、发展,说明其主要任务和三大基本研究内容,以及目前国内外块体理论研究进展和不足之处;提出本书采用的理论基础“一般块体方法”,并详细介绍了以此理论为基础开发的 GeneralBlock 软件基本分析过程。

第3章,介绍了三峡地下电站厂房区的工程概况,从地形地貌、地层岩性、断裂构造、岩体结构以及围岩类型等几方面介绍了地下电站厂房区的基本工程地质条件;建立了三维岩石块体模型,对厂房顶拱和尾水边坡进行了块体识别和稳定性分析,并考虑各块体内的组合形式,设计、施工了相应的预应力锚索或锚杆加固处理方案,并对锚杆、锚索和块体进行了系统监测。

第4章,根据国际岩石力学学会的裂隙分级,建立了35种岩体结构模型,并对这35种岩体进行了块体分析,分别讨论了这35种岩体结构的块体化程度随着模型范围变化的波动情况,得出各模型的表征单元体(REV)值。根据三峡地下电站厂房岩体的实测裂隙,通过逆建模建立地下电站厂房的三维裂隙网络模型,并进行块体分析,得出地下电站主厂房围岩的块体化程度,并与35种岩体结构的块体化程度进行比较分析。

书中采用的 GeneralBlock 软件是由中国地质大学(北京)与长江三峡勘测研究院有限公司联合开发。书中首次提出块体化程度的概念,既而量化三峡地下电站的岩体可以被视为孤立块体体系的程度,并从岩体块体化程度的角度对表征单元体的存在性进行了系统的分析,岩体结构模型块体化程度的计算分析对未来各种岩体结构完整性的预测有很好的指导意义,能对量化各工程研究区岩体整体质量提供参考。

第2章 岩石块体识别及稳定性分析理论

2.1 块体理论研究进展

岩体中存在的不连续面,也称为裂隙、结构面、节理,与施工开挖面形成不同规模的岩石块体,这些块体的失稳或垮落,既破坏岩体的完整性和整个岩体工程的稳定性,也常常在施工及其后的工程运营过程中造成各种灾害。对岩石块体稳定性的研究,可为工程规划、开挖、支护、监测等设计提供可靠的依据,为工程建设服务。

块体理论就是针对岩体在结构面切割下的稳定性问题进行研究的,主要包括三个基本研究内容:①块体识别问题;②块体运动学可移动性问题;③块体力学稳定性分析问题。

块体识别是块体理论解决实际问题的第一步。在已知研究范围岩体、露头面、岩体裂隙几何参数的条件下找出每一个独立的岩石块体,确定其空间位置、规模、几何形状等,为进一步分析块体以及岩体的稳定性做好准备。块体识别最终给出每个块体的几何定义。目前,三维块体一般是通过表面描述的方法进行定义的,即一个三维的块体由其表面多边形进行描述,每个多边形由其顺序排列的顶点进行定义,而每个顶点由其三维空间坐标确定。

块体之间是有区别的,有些块体是可能运动的,而有些块体由于周围岩体的限制在周围岩体发生移动之前是不可能运动的。由于大多数岩体未扰动时岩块本身的强度都是比较高的,块体理论中一般把岩石块体看作刚体,不考虑块体本身的破坏,块体的可移动性完全由其几何特征决定。这样,只有可移动块体才可能失稳。块体的可移动性分析最终给出每个块体是否可移动的结论。对于可移动块体一般能给出块体的可移动方向。因为块体一般被假设为刚体,而且块体的旋转运动一般被忽略,这样整个块体

的所有点的运动方向都可以用一个统一的矢量进行描述。在实际中往往可以归结为块体沿某一个裂隙面的滑落线方向（倾斜线）或某两个裂隙的共同方向（即交线方向）滑动，这时可移动性分析给出作为块体滑动面的裂隙面。

块体的稳定性分析一般是在已知块体的几何参数和结构面的力学参数的情况下确定块体的稳定性。一般用稳定性系数描述块体的稳定程度，如果一个块体的稳定系数超过某个规定值称这个块体是稳定的，否则称为不稳定的。这个规定值主要取决于块体失稳给人类带来损失的大小，如果块体失稳给人类造成灾难性后果，则这个值便会被取得很高。理论上，稳定系数大于 1.0 的块体是稳定的，小于 1.0 的块体是不稳定的。

块体理论 (Block Theory) 的理论基础是由 Goodman 与石根华和 Warburton 奠定的。Lin、Fairhurst 和 Starfield 也对理论的发展做出了很大贡献。块体理论及其在工程中的应用一直受到国内外科研人员与工程技术人员的重视。

石根华 (1977) 发表了《岩体稳定分析的赤平投影方法》，可认为是块体理论的雏形，之后在 1981 年和 1982 年又发表了相关文献。1982 年，Goodman 和石根华创立了关键块体理论，标志着块体理论基本成熟，随着国内外学者的深入认识和研究，块体理论日益被广泛接受。关键块体理论在块体识别方面提出了有限性定理，可移动方面有可移动性定理，是岩石块体理论的最成熟部分。关键块体理论建立在以下四个假设条件基础上：

(1) 所有的不连续面为严格的平面状。把不连续面假设为平面，这样所有的块体为多面体，块体的面、棱以及稳定分析中的滑动方向可以用一次的平面或矢量进行描述。

(2) 所有裂隙切穿整个研究领域。即假设裂隙无限大，所有块体都由已经存在的结构面完全定义，不考虑块体破裂形成新块体面的可能性和裂隙面的形状。

(3) 岩石块体是刚体。即不考虑块体内部的变形，这样块体能否移动，可能在哪个方向移动完全由块体的几何形状决定。

(4) 不连续面和开挖面是已知的输入参数。如果一组内裂隙的方向是变动的，则取其平均值做代表。

20 世纪 80 年代初期，Warburton (1981) 提出了块体可移动性的矢量

方法。矢量法的假设条件是：块体是自由面和裂隙面完全圈闭的多面体，块体可以是凹形的，可以包含有任意一个自由面。块体被假设为刚体，同时不考虑块体的旋转运动。这样，可以用一个唯一的矢量来描述块体中任意一点的运动方向。但是，矢量法的缺陷是未能考虑块体的转动，而且假设块体的形状是已知的，只处理可移动性问题，并不解决块体识别问题。

Lin、Fairhurst 和 Starfield (1987) 最早提出了有限大小结构面形成的块体的识别问题，并提出了最左侧绕行法 (leftmost traverse)。Lin 等 (1988) 的研究开创了寻找块体的新思路，并讨论了包括转动在内的块体运动模式的判断方法和稳定性分析。

Ikegawa 和 Hudson (1992)、Jing (1994) 和 Stephansson (2000) 改进了二维块体的基于拓扑的搜索算法，探索了有限尺寸平面切割岩体形成块体几何描述的方法；Hoerger (1998) 应用随机及确定性模型分析研究了地下开挖工程中的关键块体；Kuszmaw (1999) 一直在研究如何估计地下开挖工程中关键块体的大小，并提出了若干方法，如节理间距估计法、数值分析法和随机模型统计法等。

在应用方面，除了将块体理论在边坡和硐室的应用外 (Jesse 等, 1986; Lee 等, 2000; Hatzor 等, 2003)，也将块体理论应用于坝基稳定性分析中，如文献 Kottenstette (1997) 和 Goodman 等 (2003)，关于块体理论在坝基与坝肩岩体稳定性分析的应用，国内开展得很少。

早期，在国内块体理论主要集中在理解和应用上。刘锦华 (1988) 是较早对块体理论进行全面介绍的学者，促进了块体理论在中国的推广。其他学者也陆续发表文章详细介绍了块体理论的产生、发展，及其主要内容 (董学晟, 1987; 缪协兴, 1989; 陈乃明等, 1993)。关于块体理论在边坡、硐室等工程中的应用，王思敬等 (1984) 较早应用块体理论的矢量分析法对地下工程围岩块体进行了分析研究；方玉树 (1988) 应用赤平投影方法分析了地下工程围岩中的块体稳定性；周维恒等 (1989) 应用矢量分析法分析研究了隧道围岩的块体稳定性问题；李爱兵 (1989) 应用块体理论分析了铜录山矿边坡的块体稳定性。

近几年以来，不少学者对块体理论进行了较深入的研究，并在工程应用范围上进行了拓展。比如，张菊明等 (1997) 从数学力学分析方法入手，得到了更为合理的块体稳定性评价方法；汪卫明等 (1998) 在矢体概