

边坡工程与固体力学*

徐秉业 沈新普 岑章志

清华大学工程力学系, 北京(邮政编码100084)

提要 本文综述了近年来边坡治理工程的主要内容及其进展。对固体力学中直接与边坡工程紧密相联的以下几个研究方向的现状及前景作了介绍与展望, 其中主要包括: 本构模型的试验与理论研究; 结构的变形与稳定研究; 材料参数位移反分析等。

关键词 边坡分析; 脆塑性; 反问题

1 前言

一百多年来, 固体力学在机械、建筑、土木、水利、航空、造船等诸多工程领域得到广泛应用, 取得了重要的研究成果, 并且产生出了一大批学科分支如弹性力学、塑性力学、断裂力学、损伤力学等。近几十年来, 在岩体分析方面取得了可喜的进展, 同时也发展了新兴学科, 岩石力学就是固体力学与岩石工程实际相结合的产物。

边坡治理是近年来发展起来的一个极为重要的工程领域。它向固体力学提出了一系列的重要研究课题^[1,2], 这是因为随着工业的不断发展, 许多与边坡有关的问题都需要进行更合理的分析, 以采取正确的治理方案, 否则将造成难以弥补的损失。滑坡所带来的问题是严重的^[3,4]。例如: 在三峡工程坝址上游的新滩小镇, 在大规模山体滑坡中完全消失, 滑坡体冲入长江, 使长江航运受到阻碍; 宝成铁路每当雨季到来之时, 常常发生滑坡事故, 致使铁路运输中断; 某大型炼油厂, 厂区位于露天矿边坡附近, 由于露天开采导致厂区地基严重变形, 厂房设施受损。以上是边坡不稳定滑移造成重大经济损失的几个典型例子。随着经济建设的发展, 边坡滑移产生的问题越来越严重。为了有效地控制边坡岩体滑移量, 减少由此而造成的经济损失, 必须对边坡滑移的成因、运动规律及防治措施进行深入的研究, 这就是边坡治理工程的中心内容。

早期的边坡治理是建立在经验基础上的^[5]。随着科学技术的发展, 目前边坡治理工程已经成为一个涉及地质学、采矿学、力学、数学等诸多学科的交叉工程学科方向, 尤其是固体力学非线性理论与求解技术的发展, 为边坡行为分析提供了方便有效的手段, 极大地丰富了边坡工程的内容, 为边坡治理措施的制订与实施提供了理论依据。目前边坡治理工程研

* 国家自然科学基金和国家教委博士点专项基金资助。

究体系主要包括：建立合理的地质-力学模型、边坡岩体材料性能参数辨识、边坡岩体变形与稳定性分析、滑移防治措施的研究与实施以及边坡位移监测等^[6-10]。

2 边坡岩体模型

边坡治理首先要确定影响边坡稳定的因素是什么，也就是说，首先要找出发生滑坡或影响边坡岩体移动量的可能原因，并确定其所在位置。这就需要对边坡岩体建立地质力学模型进行分析计算或模拟试验，然后才能对症下药，确定治理措施及治理目标区域。为此，建立一个符合实际的地质-力学模型对正确解决问题是至关重要的。

地质模型的建立是通过对比坡及其邻近区域钻孔取岩，弄清不同深度岩层类别、岩层厚度及走向、有无断层及软弱结构面等地质构造情况来完成的。目前工程上一般都沿与边坡垂直方向取若干剖面^[10]，在各个剖面内进行数次竖向钻孔勘探，然后由有丰富经验的地质工程师依据实测数据和经验描绘出该区域剖面地质构造图并依此建立地质模型。

力学模型的建立与固体力学理论的发展水平及求解所采用的手段有关。以前由于计算机发展水平不够高、数值求解方法不完善等原因，工程上大多采用经验与理论分析相结合的方法来分析问题。在建立用于理论分析的模型时，一般将结构视为连续体^[11,12]。随着计算机的出现，数值求解技术有所提高，工程上广泛采用有限元法对问题的模型进行数值分析，这时一般将结构视为含有间断面的弹性体^[13]。由于局部岩土结构的变形有较强的非弹性性质，线弹性材料模型与实际结构的变形情况相差较大，计算结果不够理想。实际上，工程施工主要还是依赖对实测结果的分析及工程师的经验来进行的。进入80年代以来，计算力学数值求解技术得到了迅速发展，目前在工程中采用的力学手段主要是弹塑性有限单元法和刚塑性体的极限平衡理论。在建立岩土结构的力学模型时，一般都将结构视为包含多种材料的弹塑性节理岩体结构^[14]。

目前建立力学模型的另一个内容是建立正确的岩石类材料的本构模型，即建立应力-应变关系。岩石类材料力学性能的一个特点是在进入塑性屈服后，材料的性能劣化，承载能力下降，这种现象称为“变形软化”（图1）。由于数值计算方法在边坡治理工程中的作用越来越重要，而材料本构关系的型式在很大程度上影响数值计算结果的精度，因此近十几年来，对岩石类脆塑性材料的本构模型的研究很受重视，并有许多重要成果。现有的模型基本上可分为两类：细观力学模型和宏观唯象模型。细观力学模型包括：①建立在古典滑移线场理论基础上的微平面模型^[15-18]；②能够模拟混凝土等非均匀材料的颗粒特性的界面单元模型^[19]；③能够反映尺寸效应的 Han-Chen 模型^[20]。宏观唯象的应变软化本构模型包括：

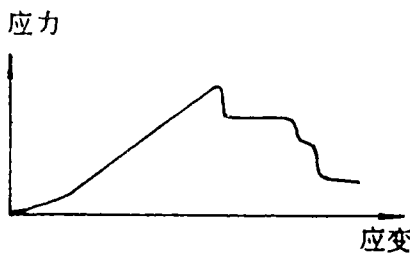


图1 岩石的变形软化试验曲线

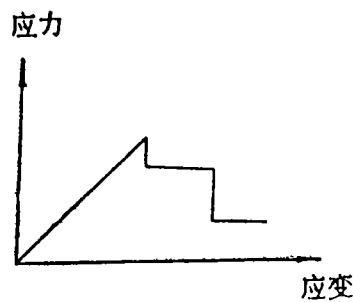


图2 简化了的岩石弹脆塑性本构模型示意图

①从土力学中演化来的经典的塑性模型^[21]；②旋转平面模型^[22]；③全应变模型^[23]，又称非线性弹性模型；④连续介质损伤力学模型^[24]；⑤断裂材料模型^[25]；⑥结合断裂理论和塑性理论的塑性断裂理论模型^[26]；⑦粘塑性和内时理论模型^[27]；⑧宏观损伤模型^[28]。

细观力学模型能比较好地反映各种类型的应变软化材料的软化现象，并能在一定程度上反映出应变软化的尺寸效应，这对于了解应变软化的力学机理有重要作用。但由于一般工程中的岩体都具有较大的几何尺度，而且目前细观力学的本构模型还只限于小型简单构件的试验研究，因此在工程中尤其是岩石工程中常用的是宏观唯象的本构模型。宏观本构模型是建立在大量实验数据基础上的客观规律，因而在一般条件下都能较好地反映客观实际情况。在诸多宏观本构模型中较为简便实用的是岩石类材料的弹脆塑性本构模型^[29,30]。该模型将应力-应变关系中的软化现象（图1）简化成脆塑性应力跌落形式（图2），这对于解析或者数值求解问题是比较方便和有效的。

3 边坡变形与稳定性分析

边坡地质力学模型确定后，分析求解所采用的方法直接影响边坡治理措施正确性。在工程上，一般采用几种不同的方法分别对问题进行分析，根据已有的观测，考核各种方法对现有边坡状态计算结果的正确度和可靠度，然后进一步分析未来边坡变形状况，评价边坡岩体稳定性并找出对边坡稳定有较大影响的若干关键因素及潜在局部失稳所在的位置，从而确定具体的边坡治理目标和相应的措施^[31]。目前常用的边坡行为分析方法可分为模型试验和模型计算两大类。

3.1 模型试验分析

模型试验是在实验室中用简化了的边坡岩体地质-力学模型，模拟实际边坡在重力及其他外部条件作用下的变形特性。对重力作用的不同模拟方式构成了不同的试验方案。工程中常见的试验方法有底面摩擦模型试验和离心模型试验^[10]。底面摩擦试验是一种二维物理试验方法，其原理是将模型平放在胶带上，用胶带运动时作用在模型底部的拖力（摩擦力）来模拟重力作用。离心模型试验方法的原理是将模型放入离心试验机中，用高速旋转产生的离心力来模拟重力作用。通过模型试验可得出当前边坡变形特性和破坏模式以及外部条件变化后边坡的变形情况。

3.2 模型计算方法

在边坡治理工程中常用的边坡稳定性计算方法可分为解析法^[32]、数值法和关键块体理论^[33]三大类。

①解析法 边坡稳定分析中采用的解析法是基于塑性力学的极限平衡法，该法将岩体视为含有剪切滑动面的刚塑性体，通过对预想结构模型的分析来评价边坡的稳定性。极限平衡法形成于本世纪20年代。目前通用的是70年代Sarma提出的“非垂直条分法”^[34]。该法认为边坡岩体除非是沿着一个理想平面或圆弧面才可作为一个完整的刚体滑动，否则岩体在滑动前需先破裂成许多块，然后相对滑动才可能发生，即在滑动前，不但要破坏岩石条块底部滑动面上的剪力平衡，而且也要克服条块侧边的剪切强度。该法适用性广，可用于诸如平面滑动、楔体滑动、圆弧滑动和非圆弧滑动等各种复杂剪切滑动面的稳定性分析。解析法的不足之处在于预设的滑移面的正确性有时难以保证。

②数值法 目前工程中常用的边坡分析数值方法以有限单元法为主^[35-37]，该方法在这

里实质上是用作一种数值模拟试验方法。在建立地质模型时，尽量详尽地考虑地质构造中不同材料的种类及断层等局部构造；在建立力学模型时，将岩体视为弹塑性节理结构，采用弹塑性节理单元模拟断层等软弱结构面，所采用的材料本构模型应是能反映材料实际力学行为的弹塑性软化本构模型。模型确定后，在计算机上对边坡受力及变形过程进行数值模拟，计算出相应于边坡在外部条件作用下的位移及应力分布状况，找出边坡上位移值最大、剪应力值最大的部位（即为结构的危险部位），以此处的稳定状况来评价边坡稳定状态，然后模拟相应的加固措施，得出在采取加固措施后边坡的稳定状况评价，从而确定边坡治理措施以及相关工程（如露天边坡开挖）的设计。图3给出了一个用有限元法求得的边坡开挖后的变形图^[38]。

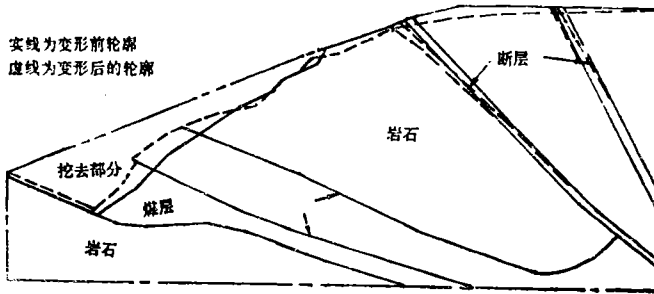


图3 开挖引起的边坡变形示意图

③关键块体方法^[33] 边坡治理的关键块体理论是拓扑学与边坡工程相结合的产物。由石根华在70年代后期提出并成功地用于西北某水利工程。其基本思想是根据实地量测得到的边坡表面裂缝的走向及拓扑关系，确定可能的最先滑落的岩石块体即关键块体的位置，并予以加固。该理论认为，虽然边坡是由被节理面（裂缝）分割开的许多岩石块体组成，但并不是所有的块体都有自由滑落的可能。只有那些滑落时不受其他块体阻碍的块体才可能发生最初的滑移，只要将这些块体预先加固，整个边坡就将处于稳定状态。块体理论充分利用节理组、岩块间的摩擦角及有关节理间距、节理长度的统计资料，直接与真实的节理图相联系，可准确计算出支撑位置和设计细节，结果的正确性可在工程中被实际经验所证实和调整。该理论自问世以来，受到国内外有关学者的关注。这一理论的应用范围主要是硬岩边坡及其他硬岩结构。当岩石强度很低，岩体表面不断产生新的裂缝时，这一理论则不适用。

4 边坡岩体材料性能参数辨识

边坡岩体是经过多次扰动的地质结构。由于结构内裂隙发育，各种材料相互交错，用取样试验手段所获得的材料参数往往不能很好地反映整个结构的实际性能，这在很大程度上影响了边坡岩体的解析计算与数值分析所得结果的正确性与可靠性。多年来，岩体材料性能参数的辨识问题一直是岩石工程及力学研究中的热门课题^[39,43]。

物性辨识的内容与手段同边坡位移与稳定性分析的求解方法有关。当采用解析法对边坡稳定性进行刚塑性体的极限分析时，反分析的目的就是要找出滑坡剪切破坏面上的抗剪能力相关参数 C 和 φ 的值，从而进一步得出对整个边坡的稳定性评价并计算出安全系数。此时反分析所依据的是已知的局部滑坡所测量的数据。

当采用数值法进行岩体物性辨识时,一般是利用边坡监测得到的位移值,反演得出岩体的力学性能参数,因此又称为位移反分析。目前常用的边坡岩体位移反分析常常采用单纯形法等各种优化算法^[33,40-42]。[38]根据最小二乘法的原理和数学物理方程适定性理论建立了多参数弹塑性位移反分析的正则化最小二乘迭代反演数值格式,并给出了一些算例。

虽然有了上述工作,但非线性材料参数辨识中的若干基本问题如完整的、高效的求解各种情况下弹塑性参数辨识问题的求解格式,所建格式的求解稳定性和抗噪声(测量误差等)的能力,以及解的唯一性等问题仍有待进一步深入研究。

5 边坡治理工程措施及边坡位移监测

边坡治理采用对软弱结构面注浆充填和对局部不稳定岩体以及其他对整体稳定性有较大影响的局部岩体打桩锚固等手段,来改善软弱结构面上材料的力学性能,提高局部结构强度,从而达到提高边坡整体稳定性的目的^[35,36]。由于地质条件的千变万化,建立的分析模型与实际有一定差别,所以在实施治理手段时,还要进行边坡岩体变形监测,以便针对出现的问题及时采取措施,确保边坡岩体稳定,避免滑坡灾难。目前工程中的变形监测是按某种要求布置若干测点,在测点处设置钻孔倾斜仪及沉降仪以测取该点的水平位移及下沉位移值。为了提高测量精度,上述装置还采用了红外技术及激光技术。

6 结束语

固体力学是岩石力学的基础,也是解决边坡工程中岩体工程力学分析问题的基础理论之一。目前各种工程规模越来越大,结构也日趋复杂,其安全性和经济性愈来愈引起人们的关注,对固体力学理论的要求也日益迫切。但是,由于受当前理论水平的限制,对边坡岩体的某些力学行为(如变形局部化)的力学模拟还不尽人意,为了更好地为边坡工程服务,固体力学理论研究必须在以下几个方面取得进展。

①根据地质材料的特点,通过宏观和细观以及统计学的研究,给出正确的本构关系。②研究固体力学经典概念在岩体材料范围内的适用程度,并研究在什么情况下需要采用新的方法去分析问题。③发展与材料本构模型相应的数值计算格式,用来求解边值问题。④研究实验室和现场的测试方法并设计各类不同需求的测量设备,从而可以将理论计算和实验室测量结果与现场实测结果相比较,判断实验及计算的正确程度。⑤注意将相邻学科所取得的研究成果引入边坡工程研究,如模糊数学、专家系统、岩石水力学、环境岩石力学等,这有利于相互促进相互渗透,从而促进学科发展。

边坡工程的研究对象是复杂的地质体,其结构形态及材料性能参数的分布均具有一定的模糊性和随机性;而固体力学是一门模型简单且计算精确的学科,仅仅用理想的模型和精确的理论来描述一个复杂的、具有一定随机性的结构及其力学行为显然是非常困难的。这首先表现在边坡体的力学模型的建立过程中。边坡构造的复杂性使得地质工程师无法提供精确全面的地质资料,为了建立整体模型不得不依据经验类比,进行模糊判断。因此力学分析所采用的力学模型最多只能在整体效果上与原有结构等效。固体力学的困难还在于通过实测所获得的材料参数往往不能很好地反映整个结构的性能分布。采用实测参数通过计算所获得的结果有时与实际情况相去甚远。上述情形使得边坡岩体材料参数位移反分析的研究越来越显得重要。因为从理论上讲,只要建立的模型整体上反映了原有地质构造,采用的本构模型能反映岩体的宏观非线性行为,通过反分析所获得的材料参数值能够反映实际岩体的整体行为,

而这里的主要困难是：①限于当前勘探水平，难以查清深层地质构造。②边坡材料种类较多，分布复杂，如果反分析的未知量太多，则计算量巨大；未知量少则所得结果又过于粗糙。因此，反分析目标未知量的确定往往更需要经验指导。

边坡治理工程是一项具有高度复杂性的涉及力学、地质学、采矿学等众多学科的综合工程，现有问题的最终解决不仅取决于固体力学理论水平及其他相关专业技术水平的提高，而且还取决于力学与地质学，采矿学等学科相互融合、相互协调程度的提高。

参 考 文 献

- 1 Cruden D M. Rock slope movements in the Canadian cordilera. *Canadian Geotechnical Journal*, **22**, 4 (1985) : 528—540
- 2 徐秉业, 岑章志, 沈新普. 岩土结构弹脆塑性有限元分析及其应用. 固体力学及其工程应用. 清华大学出版社, 北京 (1993) : 242—247
- 3 沈新普, 岑章志, 徐秉业. 边坡治理工程. 百科知识, 9 (1992) : 52—53
- 4 李跃云, 肖卓凡. 滑坡整治工作中的几项回顾与思考. 滑坡文集 (八). 中国铁道出版社, 北京 (1988) : 9—16
- 5 Ulichkin G M. Slide of a slope with foundations of an industrial building. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **26**, 6 (1990) : 239—242
- 6 铁道部科学院西北研究所. 滑坡防治及研究综述. 滑坡文集 (一). 人民铁道出版社, 北京 (1976) : 25—42
- 7 傅永贵. 工程滑坡及其防治. 滑坡文集 (五). 中国铁道出版社, 北京 (1986) : 1—8
- 8 Schuster R L, Krized R J 编 (铁道部科学研究院西北所译). 滑坡的分析与防治. 中国铁道出版社, 北京 (1989)
- 9 胡余道. 滑坡基本要素及其在实践中的意义. 滑坡文集 (八). 中国铁道出版社, 北京 (1988) : 1—8
- 10 王恭先. 滑坡过程的力学分析. 同上: 17—24
- 11 Bishop A W. The use of the slip circle in the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, **5**, 1 (1955) : 7—17
- 12 Morgenstern N R, Price V E. The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, **15**, 1 (1965) : 79—83
- 13 Goodman R E. *Methods of Geological Engineering in Discontinuous*. West Publishing Company (1975)
- 14 Dennis C. Deformation of open pit mine slopes by deep seated toppling. *Inter. J. Surf. Mine. Reelama*, **4**, 4 (1990) : 153—164
- 15 Bazant Z P. Microplane model for brittle-plastic material: 1 Theory. *J. Engng. Mech.*, **14**, 10 (1988) : 1672—1702
- 16 Bazant Z P, Gambarova P G. Crack shear in concrete: Crack band and microplane model. *J. Struct. Engng., ASCE*, **110**, 9 (1984) : 2015—2035
- 17 Bazant Z P, Kim J K. Creep of anisotropic clay: Microplane model. *J. Geotech. Engng., ASCE*, **112**, 4 (1986) : 458—475
- 18 Bazant Z P, Prat P C. Microplane model for brittle-plastic material: 2 Verification. *J. Engng. Mech., ASCE*, **114**, 10 (1988) : 1689—1702
- 19 Zubelewicz A, Bazant Z P. Interface element modelling of fracture in aggregate composites. *J. Engng. Mech., ASCE*, **113**, 11 (1987) : 1619—1630
- 20 Chen W F. Evaluation of plasticity-based constitutive models for concrete materials. *Solid Mech. Arch.*, **13**, 1 (1988) : 1—63
- 21 Chen C T, Chen W F. Concrete in biaxial cyclic compression. *J. Struct. Engng., ASCE*, **101**, 4 (1975) : 461—476
- 22 Zubelewicz A, Bazant Z P. Constitutive model with rotating active plane and true stress. *J. Engng. Mech., ASCE*, **113**, 3 (1987) : 398—416
- 23 Gerstle K H. Simple formulation of biaxial concrete behaviour. *J. Am. Ccnctr. Inst.*, **78**, (1981) : 62—68
- 24 Krajcinovic D, Fenšek G V. The continuous damage theory of brittle materials. Part I: General theory. *J. Appl. Mech. Trans.*, **48**, 4 (1981) : 809—815
- 25 Dougill J W. On stable progressively fracturing solids. *J. Appl. Math. Phys. (ZAMP)*, **27**, 3 (1976) : 423—436

- 26 Bazant Z P, Kim S. Plastic-fracturing theory for concrete. *J. Engng. Mech., ASCE*, **105**, 3 (1979) : 407—428
- 27 Bazant Z P, Shieh C L. Hysteretic fracturing endochronic theory for concrete. *J. Engng. Mech., ASCE*, **106**, 6 (1980) : 926—950
- 28 Ortiz M A. A constitutive theory for the inelastic behaviour of concrete. *Mech. Mater.*, 4 (1985): 67—93
- 29 Dems K, Mroz Z. Stability condition for brittle plastic structure with propagation damage surface. *J. Struct. Mech.*, **13**, 1 (1985) : 85—122
- 30 刘文政, 徐秉业. 脆塑性结构稳定问题的提法与梁的纯弯曲计算. 清华大学学报, **28**, 5 (1988) : 1—10
- 31 刘天泉等. 抚顺西露天矿北帮边坡及石油一厂地表变形综合整治总体设计书. 煤炭科学研究总院, 北京 (1992)
- 32 Hoek E, Bray Z W (卢世宗等译). 岩石边坡工程. 冶金工业出版社, 北京 (1983)
- 33 Shi G H, Goodman R E. The key blocks of unrolled joint traces in developed maps of tunnel walls. *Inter. J. Numer. Analyt. Meth. Geomech.*, **13**, 1 (1989) : 131—158
- 34 Sarma S K. Stability analysis of embankments and slope. *Geotechnique*, **23**, 3 (1973) : 423—433
- 35 Day R W. Fill-slope failure and repair. *J. Performance of Constructed Facilities*, **6**, 3 (1992): 161—168
- 36 Hull T S, Lee C Y, Paulos H G. Mechanics of pile reinforcement for unstable slopes. Research Report—University of Sydney, School of Civil and Mining Engineering, No. 636 (1991): 36
- 37 Griger'ev V V, Kovhlenko V A, Vsmanov S F. Engineering method of determining the limiting slope angles in deep quarries. *Soviet Mining Science*, **26**, 5 (1991) : 401—411
- 38 沈新普. 岩土工程弹脆塑性数值研究及材料参数识别的反演方法. 清华大学博士学位论文 (1993)
- 39 Xu Bingye; Shen Xinpu, Cen Zhangzhi. The identification of material properties for elasto-plastic structure. Proc. of IMMM '93 Kamihama Japan: 95—102
- 40 Maier G, Giordano G. Direct search solution of an inverse problems in elasto-plasticity: Identification of cohesion, friction angle and in situ stress by pressure tunnel tests. *Inter. J. Numer. Methods Engng.*, **15**, 8 (1980) : 1823—1848
- 41 王起新. 边坡工程中软弱结构面力学参数的反分析. 岩土力学进展. 中国展望出版社, 北京 (1988): 131—137
- 42 王昌明. 用已知位移反求平面应变问题的弹性模量. 长江科学院院报, **9**, 2 (1992) : 62—66
- 43 Cen Z Z, Shen X P, Xu B Y. A numerical method of material identification in rock-engineering. In: Siriwardan, Zaman (eds). *Computer Methods and Advances in Geomechanics* (1994) : 2229—2234

ROCK-SLOPE ENGINEERING AND SOLID MECHANICS

Xu Bing-ye Shen Xin-pu Cen Zhang-zhi

Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084

Abstract Some recent works on solid mechanics for rock-slope engineering have been summarized. The present paper gives some discussions on the following investigations: Theoretical and experimental research on constitutive model of rockmass; Displacement and stability analysis of rock-slope; Inverse analysis of material properties by displacements of rock-slope.

Keywords *slope analysis; brittle-plasticity; inverse problems*