

锚固与注浆 新技术

——第二届全国岩石锚固与注浆学术会议论文集

中国岩石力学与工程学会岩石锚固与注浆技术专业委员会 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



JU 472.53
Y21

锚固与注浆新技术

——第二届全国岩石锚固与注浆学术会议论文集

中国岩石力学与工程学会岩石锚固与注浆技术专业委员会 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

锚固与注浆新技术

——第二届全国岩石锚固与注浆学术会议论文集
中国岩石力学与工程学会岩石锚固与注浆技术专业委员会编

中国电力出版社出版、发行
(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)
北京通天印刷厂印刷



2002年6月第一版 2002年6月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 24.75印张 557千字

书号 155083·434 定价 39.00元

版权专有 翻印必究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)



目 录

编者的话

锚固与注浆理论

- 适应地质工程发展,开展锚控支护研究 梁炯鋈,杜 彬 (3)
- 软岩隧道锚杆支护机理的数值解析 杜守继,孙 钧,职洪涛,翁慧俐 (6)
- 岩石锚固技术理论与实践 于学馥,蔡美峰,宋存义 (11)
- 新世纪岩土加固技术的回顾与展望 陈耕野,杜嘉鸿 (17)
- 扩大头锚杆在软土地区锚固工程中的应用与发展 翟金明,周丰峻,刘玉堂 (26)
- 水泥复合浆液中磷酸盐缓凝剂的优选与浆液性能研究 阮文军,靖向党 (32)
- 初探土钉支护开挖时间控制方法 蔡灿柳,沈贵松,赵清荣 (39)

设计·监控

- 水布垭地下厂房加固效果研究 周维垣,杨 强,杨若琼,陈帅宇 (45)
- 锚杆工况监测新技术——测力锚杆 鞠文君 (53)
- 浅谈基坑喷锚支护的质量监理 张伟进 (57)
- 公路隧道锚固复合式衬砌及其施工现场监控量测 赵玉光,高 波 (62)
- 一种新型基础方案——微型钢管压浆桩的设计、施工与试验 徐化轩 (68)
- 有关土性注浆复合地基承载力计算的探讨 邵锦周 (76)
- 南京地铁张府园车站深基坑邻近建筑保护技术 陈瑞阳 (79)
- 地铁交叉隧道换乘站处沉降控制研究 刘金鹏,纪颖波 (83)

论证·探讨

- 深基坑支护工程失事原因分析 田裕甲,宋浩契,田在军 (93)
- 对钢管锚杆设计和施工方法的讨论 张 勇,任辉启 (101)
- 高喷防渗技术在陆水水库及试验自备电站的应用分析 肖汉平 (107)
- 岩石坝基固结灌浆合理布置的讨论 邱 敏 (110)
- 喷锚支护回顾与土钉支护讨论 孙学毅 (113)

施工工艺与施工技术

- 土质边坡预应力锚索桩板墙施工技术 王新民, 王泽国 (119)
- 黄壁庄水库电站重力坝坝前水上帷幕灌浆施工技术 ... 刘海刚, 杨永海, 田艳龙 (125)
- 单管施喷大直径桩的异型喷头工艺技术 廖南, 韦江汉 (132)
- 袖阀管灌浆法在软土地基加固工程中的应用 薛炜, 邝健政, 孙洪涛, 毕继生, 白求力 (137)
- 真空辅助压浆技术在预应力工程中的应用 刘锡璋, 李海燕, 张保和 (143)
- 迈式注浆钻进锚杆在千枚岩地层中的应用技术 雷军, 和万春 (149)
- 地铁王府井——东单区间折返线及渡线施工方案研究实施 汪昭富 (155)
- 隧道富水断层深孔预注浆施工技术 张瑞全 (161)
- 小导管浅孔帷幕注浆施工技术 马栋, 黄立新 (166)
- 40米长锚管棚预注浆控制地表下沉施工技术 彭济南 (173)
- 葛亭矿轨道大巷注浆法过断层施工技术 王联 (178)
- 广州市黄浦大道石牌东人行过街隧道注浆防水施工技术研究 朱小藻 (183)
- 金马碧鸡坊地下室施工技术 桂建乐 (190)
- 杂填土地基静压振冲注浆加固技术 张斗群, 高岗荣 (196)
- 浅埋城市公路隧道穿越火车站施工技术 陈树林 (199)
- 跟踪注浆加固深基坑旁既有建筑物地基 赵喜海 (204)
- 隧洞回填灌浆方法探优 张景秀 (208)
- 东秦岭特长隧道施工技术探讨 刘为民, 彭晓斌 (214)
- 天堂山拱坝裂缝化学灌浆施工 卓寒清 (221)
- 地下工程洞群系统综合防水施工技术 程炜, 王世平, 赵玉奎 (226)

工程应用·实例

- 尾矿库基础坝高压定喷防渗 杜嘉鸿, 王杰, 陈兰云 (233)
- 三峡工程衬砌混凝土层面缝化学灌浆处理探讨 廖国胜, 黄良锐, 王劲松 (238)
- 复合土钉技术在软土基坑工程中的应用 袁培中, 张新乐, 杨仁华, 郭晓辉 (242)
- 公路高边坡喷锚支护应用 黄海, 王振中, 翟金明, 王继伟, 刘水江 (249)
- 纳米技术在敦煌石窟等文物保护领域中的应用探索 ... 杜嘉鸿, 翟秀静, 陈兰云 (253)
- 预应力锚索在京珠高速公路粤境南段瓮城至汤塘段的应用 白利军 (257)
- 预应力锚索在某基坑支护中的应用 刘加洛 (261)
- 预应力锚索在高边坡病害治理中的应用 姚占魁, 方利成, 郑翔 (265)
- 新二管法在膜袋围堰中的应用 姚顺章, 张震, 查振衡 (270)
- 在超深厚、大粒径、高含量卵碎石层中钻孔注浆 王军, 李文钊 (275)

三元里折返线地基加固的注浆工程实例	张琦 (278)
高压喷射注浆在修补挖孔桩缺陷中的应用	崔双立, 刘瑞钾 (283)
用注浆法对缺陷基桩补强加固	王军 (288)
复杂地层中土洞(溶洞)处理措施	黄效白, 王启铜 (292)
钢管桩在龙王庙隧道出口坍塌边坡的应用	彭锋, 刘明杰 (298)
二重管旋喷注浆技术在水闸基底防渗中的 应用	高岗荣, 张斗群, 徐润, 袁辉 (302)
多头搅拌防渗墙技术在东改供水工程的应用	冯双会 (306)
复杂环境、软土地区深基坑工程构筑 ——泉府大第商住楼深基坑工程实录	戴瑞奇, 沈宏坤, 阙甲林 (310)
引沁入汾草峪岭隧洞混凝土开裂整治技术	丁善焯, 胡薇, 臧存峰 (318)
低强度素混凝土刚性桩复合地基处理技术在 120m 烟囱中的应用	王亦德, 宋云梅 (323)
人防工程通过楼群建筑浅埋暗挖施工技术	李杰, 杨哲峰, 齐勇 (328)
应用改性灌浆水泥对大黑汀水库坝基防渗帷幕进行补强施工	邓百印 (333)

其 他

高海拔高寒隧道综合施工技术	杜彬 (343)
青藏铁路多年冻土区路基填筑技术探讨	程红彬 (352)
秦沈客运专线路基填筑施工技术	刘再华 (357)
松散含水地层中土压平衡顶管施工技术	王暖堂 (362)
考虑基础、基坑支护综合效益的结构设计方案优选	韩建强, 宋庆东 (366)
旧城区基础设计的探讨	宋庆东, 韩建强 (371)
城市地铁隧道穿越高层建筑的桩基置换施工技术	潘秀明, 王暖堂, 詹黎明 (376)
振冲置换碎石桩加固高层建筑下软土地基技术探讨	孙东瑞 (381)

锚

固

与

注浆理论



适应地质工程发展，开展锚控支护研究

梁炯蓉¹，杜彬²

(1. 岩石锚固与注浆技术专业委员会，北京 100850；

2. 中铁十六局集团有限公司科研开发处，北京 100018)

摘要：本文从岩土工程概念与锚喷支护发展关系中，提出了开展锚控支护研究的建议。

关键词：地质工程；锚控支护

1 概述

在“工程地质体控制论”一文中，我们曾对工程地质体与地质工程给出了明确的定义。1999年10月，在广州召开的“锚固与注浆面向新世纪国际会议”上，作者作了“我国岩土工程概念的发展”特邀报告，系统论述了岩土工程概念的发展，并把岩土工程概念划分为三个不同的概念：结构工程、岩体工程、地质工程。本文拟从锚喷支护发展过程与趋向，初步探讨适应地质工程发展、开创锚控支护综合技术研究的问题。

2 锚喷支护发展回顾

锚杆的应用源远流长，可以追溯到古代修筑栈道采用的木锚杆。作为现代修筑隧道用的锚杆、喷射混凝土技术，则是20世纪40年代初始于国外，20世纪60年代引进我国。锚喷技术与新奥法大体上是同时引进的，在某些部门，如铁道部等，则强调推广新奥法；在某些部门，如军队，则强调推广喷锚技术。从国外引进时，随国外流行称谓，统称为喷锚结构。因为当时流行的喷锚结构设计理论，都沿用结构工程的荷载—结构模式，如悬吊理论、组合拱理论等。新奥法的原理曲线应用了芬纳方程来说明支护对围岩应力调整的影响，提出了最小支护抗力问题，但是它给出的“承载环”概念，也没有摆脱荷载—结构模式。应当指出，新奥法是新奥地利施工法的简称，主要发明人伯塞维兹教授将新奥法定义为隧道建筑的概念而不是构筑方法，并极力否认与喷锚技术相关。但是，推广新奥法的支持者无不肯定喷锚结构是新奥法的主要支护形式，如日本土木学会编写的《新奥法手册》，对新奥法作如下定义：新奥法是以锚杆和喷射混凝土为主要支护结构，在尽量抑制围岩强度恶化，积极发挥围岩本身所具有的承载能力的同时，依据现场量测结果来推导隧道设计与施工的方法。如果不是采用喷锚技术怎能形成“承载环”呢！经过我国广大科研、设计、施工人员对喷锚技术的推广应用与研究、理论观测、计算分析等，逐步认识到岩体工程应当按岩体力学来研究岩体的应力状态，约束围岩变形，改善岩体强度，使之有利于围

岩的稳定性。因此，大家使用锚喷支护的称谓，而不采用国外通用的锚喷结构。这两个不同称谓，是有较大区别的，实际上，反映了两种不同理论指导下运用锚杆、喷射混凝土技术的内涵，也即两种运用锚杆、喷射混凝土技术的不同概念。显然，我们不与外国“接轨”，不是落后，而是概念的超越。之后，各部门不断编写出锚喷支护相关的规定、规范等。主要有：

1984年7月，总参谋部颁发的国家军事标准 GJB 317—1987 《国防工程锚喷支护技术暂行规定》；

1985年12月，国家计划委员会颁布的国家标准 GBJ 86—1985 《锚杆喷射混凝土支护技术规范》；

1990年11月，中国工程建设标准化协会批准的 CECS22:90 《土层锚杆设计与施工规范》；

1994年，水利部批准的部颁标准 SL46—1994 《水工预应力锚固施工规范》；

1998年6月，水利部批准的部颁标准 SL212—1998 《水工预应力锚固设计规范》。

从上述可见，自1984年7月起，我国把喷锚支护统一改称为锚喷支护，一直沿用至今。当然，锚喷支护与喷锚支护没有概念上的区别。

3 适应地质工程发展，开展锚控支护研究

定义是揭示概念内涵的逻辑方法。为了避免造成概念混乱，故先表述下列几个定义。地质工程是用工程措施控制工程地质体，使之具有服务功能的工程。

工程地质体是在内或外动力作用下形成并经过地质演化，受环境因素制约，服务于工程的地质体。

地质工程与岩体工程及环境因素的关系如图1所示。

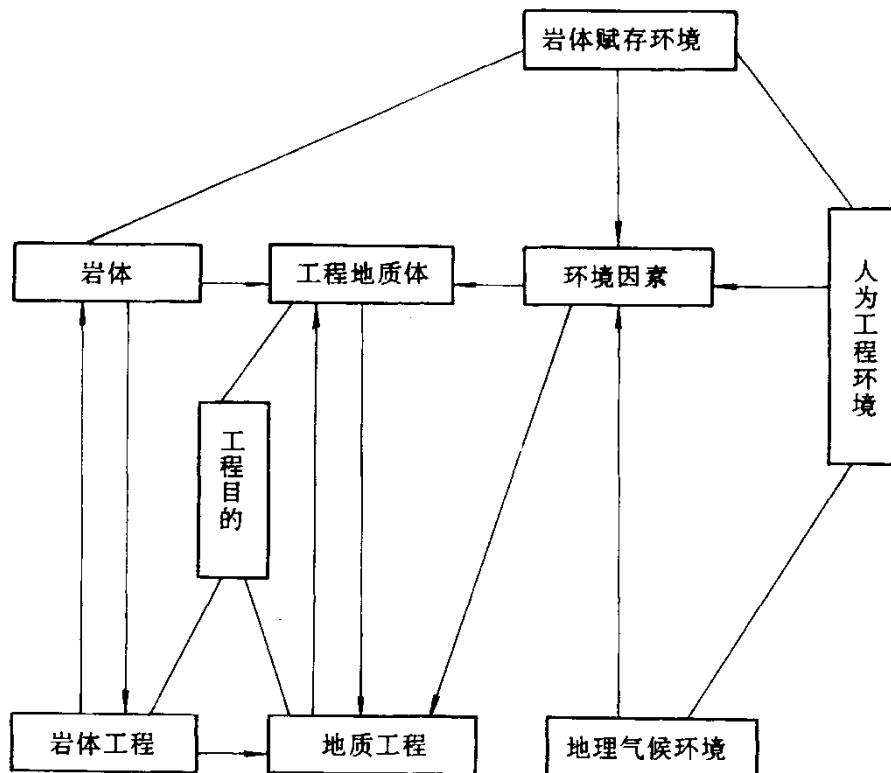


图1 地质工程与岩体、岩体工程及环境因素的关系图

工程地质体控制论是研究工程地质系统的控制和调节规律的科学，它是为满足工程实践、工程建设的需要，工程技术与地学发展以及系统理论应用的产物。具体表述如下：在工程地质体中，采用有效的调控技术，经过反馈调节，适时地控制岩体变形，调整岩体强度，改善岩体应力状态，维护与改善环境稳定性，以期使工程地质体的工程能力得到充分发挥，从而获得地质工程系统的最佳效益，优质高效地实现工程目的。

综合技术的内涵很宽广，实际上，工程实践显示的综合技术就是以锚喷支护为主要支护形式，根据环境因素的类别、影响范围大小，所采取调节支护强度，控制环境因素的影响，使岩体、环境、工程措施三者达到新的稳定平衡的综合技术措施。在工程实践中，科研、设计、施工的广大科研人员，已经创造了不少有效的综合技术。不足之处是，缺乏系统的指导思想以及按工程地质体进行分类总结，探讨环境控制与岩体工程锚喷支护的共同作用规律问题以及优化选择问题。为了加强这方面的总结，以适应工程地质概念的发展，我们特提出相应的综合技术称谓，即锚控支护。为了避免造成概念混乱，按照逻辑学的要求，拟将锚控支护定义为：按照地质工程概念，以锚喷支护为基本形式，结合维护与增强工程地质体稳定性的其他技术措施，对工程地质体进行过程控制，使地质工程获得安全、经济、高效的综合调控工程技术。

环境因素包括岩体赋存环境、认为工程环境以及地理气候环境。应当充分认识环境因素的多样性、复杂性、危害性，必须因地制宜、认真对待。当然，以往的工程实践都已进行了许多控制工程地质体的措施，不过，以往都是“兵来将挡”、“各就各位”的，如西单地铁车站，采用大管棚与小导管注浆相结合的超前支护与锚喷支护相结合的措施，实际上这就是一种锚控支护。如果以锚控支护来统率、归纳、协调、优化，就要求利用系统理论，从勘察、设计、施工中，针对工程地质体的状况，不仅要考虑岩体加固问题，而且要把所有工程措施都归纳为锚控支护的内容中，以达到预见、统一、协调、优化的目的。我们还可以通过工程实践经验，把地质工程区分不同类型，如城市地铁地质工程、深埋长隧道地质工程、高应力地区隧道地质工程、越江隧道地质工程等。从工程实践中，进行锚控支护综合技术的总结，从中探索各类地质工程的特点，锚控支护综合技术的组成及其效果，以利于推广应用。

4 参考文献

- 1 梁炯璠，黄鼎成，邢念信，林选青. 工程地质体控制论. 岩石力学与工程学报，1992年第2期
- 2 梁炯璠. 我国岩土工程概念的发展. 梁炯璠科技文选. 北京：中国矿业大学出版社
- 3 梁炯璠. 如何对待新奥法. 隧道与地下工程，1985年第2期

软岩隧道锚杆支护机理的数值解析

杜守继¹, 孙 钧², 职洪涛³, 翁慧例¹

(1. 上海交通大学土木建筑工程系, 上海 200030; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 3. 上海地下建筑设计研究院, 上海 200011)

摘 要: 本文紧密结合软岩隧道工程地质和支护设计特点, 应用有限差分方法 (FLAC) 模拟了软岩隧道受力变形特征和围岩收敛曲线, 研究初期支护中系统锚杆的作用机理及作用效果, 为隧道锚喷支护设计与施工提供依据。

关键词: 软岩隧道; 有限差分方法; 系统锚杆

1 引言

隧道锚喷支护紧跟隧道开挖面设置, 其自身和周围岩体构成的共同承载体系对隧道软弱围岩的变形与稳定起着决定性的影响。而初期锚喷支护中系统锚杆又起着主要作用, 但是它的岩体锚固机理还远未搞清楚, 致使锚固技术的合理性没能充分发挥, 许多工程主要还是依靠经验进行类比设计和施工, 常需耗费大量资金来提高安全系数。以这种方式追求工程的安全性, 可能会适得其反。为了克服岩体锚固工程中的盲目性和不合理性, 应该对系统锚杆的锚固机理进行研究, 建立比较完善的岩体锚固理论。国内外的学者对锚杆已做了大量的理论和实验研究, 并且随着计算机应用的发展, 对各种较复杂工程条件下锚杆作用的数值分析方法, 诸如有限元法、边界元法、有限差分法等也发展起来, 并已取得许多有价值的成果。但是, 由于实际工程中涉及到的岩土地质情况十分复杂, 对隧道锚杆支护结构来讲, 其作用机理及围岩与支护的相互作用关系, 尚有诸多问题需要进一步研究。

因此, 本文紧密结合京珠高速公路粤境北段某软弱围岩隧道工程地质和支护设计特点, 应用快速拉格朗日有限差分数值方法 (FLAC), 定量研究隧道系统锚杆与围岩共同承载体系的受力与变形特性, 计算锚杆—围岩承载环的洞周位移收敛线, 为隧道锚喷支护设计与施工提供依据。

2 有限差分数值方法 (FLAC) 概述

FLAC (Fast Language Analysis of Continua) 是国外近十几年兴起并发展起来的一种用于工程力学计算的显式有限差分程序, 该程序可模拟土、岩石等材料的力学行为, 适应于多种材料模式与边界条件的非规则区域的连续介质求解问题。在求解过程中, FLAC 采用动力松弛法, 不需要形成刚度矩阵, 避免了直接求解大型联立方程组, 便于在微机上求解较大规模的工程问题。与有限元法相比, FLAC 在处理几何非线性和大变形问题上具有

明显优势。

FLAC 程序中采用多种类型的力学本构模型，如摩尔—库仑弹塑性模型、应变硬化/软化模型、节理模型等，来模拟非线性、大变形及不可逆等地质材料的变形特征。FLAC 还采用四种结构单元，即梁、锚杆、桩及支柱单元，来模拟支护结构。

FLAC 程序采用的 Lagrangian 法是一种分析连续体非线性大变形问题的数值方法。这种方法遵循连续介质的假设，利用差分格式，按时步积分求解，采用拖带坐标系，随着结构形状的变化不断更新坐标，允许连续介质有大的变形。FLAC 的求解过程是：首先，离散结构为若干单元 (Zone) 和若干网格点 (Gridpoint) 相互连接的连续网格体系，在此体系中，单元与网格点应满足下列平衡方程

$$\partial \sigma_{ij} / \partial x_j + \rho g_i = \rho u \quad (1)$$

为获得公式 (1) 的真实解，在尽可能少的虚拟时间里，划分多个时步，按照图 1 步骤对网格中单元与网格点循环往复计算，直至不平衡力消失，各点的位移与应力分别趋向常数。

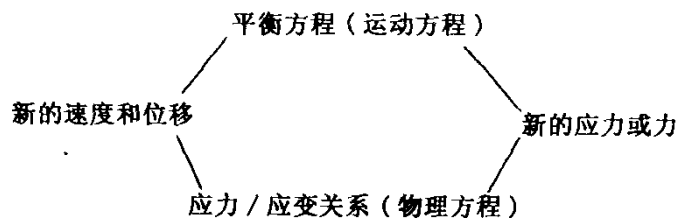


图 1 FLAC 计算过程示意图

3 数值模拟对象及模型建立

3.1 模拟对象

应用岩土工程有限差分程序 FLAC 对京珠高速公路粤境北段某软岩隧道开挖与初期支护的数值进行分析。数值分析的目的在于：①证实基本的设计假定；②鉴别隧道开挖周围岩体的重要特性机理；③估算隧道支护构件的荷载；④估计隧道开挖引起围岩的变形。在此，数值模拟对象为某软岩隧道出口一定埋深段，此段围岩为微风化砂岩，中厚层，砌块体状结构，裂隙较发育，完整性较差，属 IV 类围岩，隧道埋深 70m。隧道初期支护结构为 C20 喷混凝土（厚 15cm）+ $\phi 8$ 钢筋网（间距 20cm \times 20cm）+ $\phi 22$ 全长黏结式砂浆锚杆（杆长 2.5m，间距 1.5m \times 1.5m），二次支护结构为 C20 模注混凝土衬砌（厚 40cm）。模拟重点是隧道开挖与初期支护，尤其是系统锚杆支护后地层变形与应力特征，以考察地下洞室锚杆作用效果。

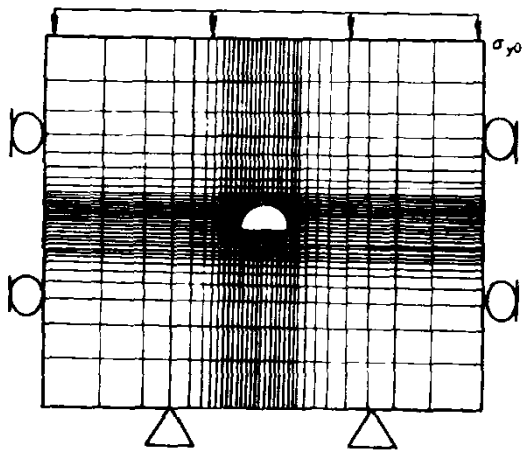


图 2 数值解析区域图

3.2 模型建立

数值解析区域为 120m \times 120m，采用位移边界条件，底部边界采用固定约束，上部边界加垂直压应力 $\sigma_{y0} = \rho g h_0$ ($h_0 = 16.35\text{m}$)，两端边界处沿 x 方向固定约束（模型见图 2）。FLAC 程序自动划分网格，根据需要隧道周围 10m 范围内按一米间距划分，而后网格间距逐渐变大。地质材料力学模型采用 Mohr-Coulumb 弹塑性模型，FLAC 模型针对此处地层条件模拟了从开挖到锚杆支护的全过程，借助一维钢索单元连同锚杆对于剪切连接弹簧具有适当刚度的岩

体建立了岩石锚杆单元。没有打算模拟连同锚杆使用的喷混凝土薄层和钢筋网，因为锚杆被认为是决定稳定隧道开挖的主要支护单元，而喷混凝土薄层和钢筋网是在锚杆之间起着外罩的作用。地层材料和结构材料计算参数如表 1 所示。初始应力场中垂直应力 $\sigma_y = \rho gh$ ，水平应力 $\sigma_x = k\sigma_y$ ，其中，系数 $k = \nu / (1 - \nu)$ 或根据经验确定。

表 1 计算参数

围岩力学参数	弹性模量 E (MPa)	泊松比 ν	黏聚力 C (MPa)	内摩擦角 ϕ (度)	密度 ρ (kg/m^3)	抗拉强度 σ_t (MPa)	抗压强度 σ_c (MPa)
		3900	0.24	1.27	39.2	2580	0.33
锚杆参数	杆模量 E_g (GPa)	杆直径 d (mm)	杆抗拔力 (kN)	锚固区砂浆刚度 (N/m/m)	锚固区剪切强度 (N/m)	杆长度 L (m)	
	45	22	250	1.75×10^7	2.0×10^5	2.5	

4 数值模拟结果及分析

4.1 隧道围岩 FLAC 平衡分析

为获得公式 (1) 中应力的真实解，按照图 1 步骤对网格中单元与网格点循环往复计算，当不平衡力减小到允许值后，可以认为位移与应力分别趋向稳定常数。图 3、4 分别显示了最大不平衡力和隧道拱顶垂直位移随时步增加的变化规律。从图 3 观测出，隧道开挖与初期支护后，随着计算时步的增加，最大不平衡力在初始阶段快速减少，循环计算 1000 步后，减少幅度变小，最终在计算 4300 步后趋于容许范围内（一般小于 100Pa），同时从图 4 观测出，隧道拱顶垂直位移最终趋于稳定值。这说明此段软弱围岩隧道数值模拟需循环计算 4300 时步，才可达到稳定平衡。

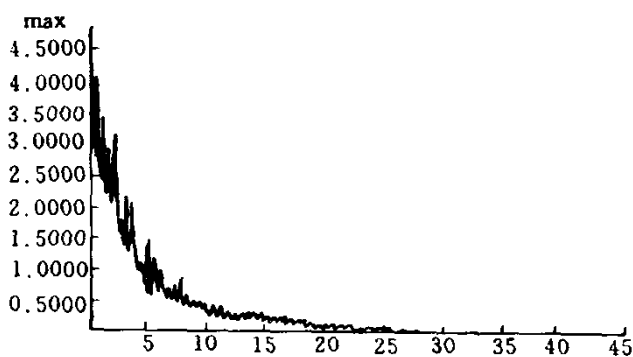


图 3 最大不平衡力随时步变化规律

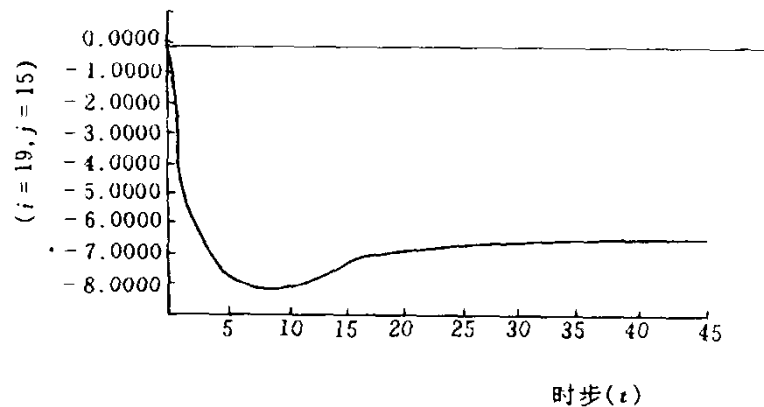


图 4 隧道拱顶垂直位移随时步变化规律

4.2 隧道围岩位移场与应力场分析

此处隧道埋深较深，围岩强度较高，图 5 至图 7 概括了此段隧道的分析结果。图 5 显示预测的隧道开挖周围位移分布规律。预测的最大位移是 7mm 左右（见图 4），发生在隧道拱顶。在隧道中，实际量测的位移可局部超过预测值，因为用连续体模型模拟岩体不可能完全抓住岩石中局部的变形模式。设计过程中不应考虑预测的位移能提供隧道收敛的绝对估计值，而应由此来看规定支护是否足以把位移限制到相对小的值，并把它作为岩体范

围内主要特性机理。同时进行参数研究，调查预测位移对岩体特性的变化和假设的支护类型的相应敏感度。数值方法与经验方法相比，能够更准确地估计变形，由此，能以一个合理的精确度估计岩体性能。

图 6 显示了预测的开挖隧道周围应力场分布规律。从图中观测出在拱脚和 45°拱腰处，发生应力集中现象。由于隧道开挖引起围岩应力重分布，致使隧道周边切向应力大于径向应力。图 7 显示了预测的隧道周围塑性屈服带的范围。屈服带包括计算过程中任一点应力超过屈服标准范围的所有地带，包括应力目前在屈服面下的地带。由于 FLAC 所用解的方案，屈服带不应被看作不得不进行全支护的“破坏”岩层带，可认为是岩体可能松弛的范围。由图 7 可知，岩石锚杆延续穿过松弛岩体且有一定长度锚固在“未扰动”的岩体中。

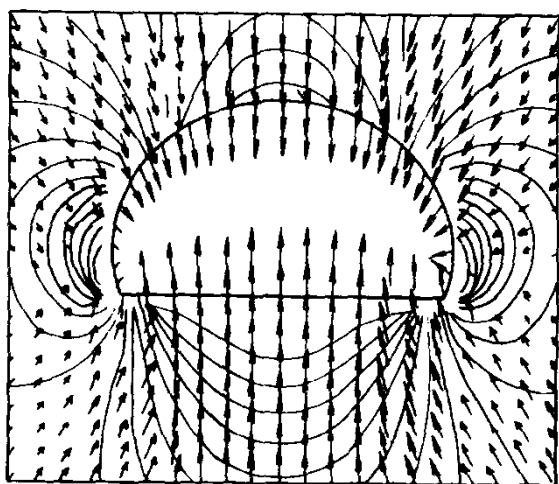


图 5 隧道围岩变形分布

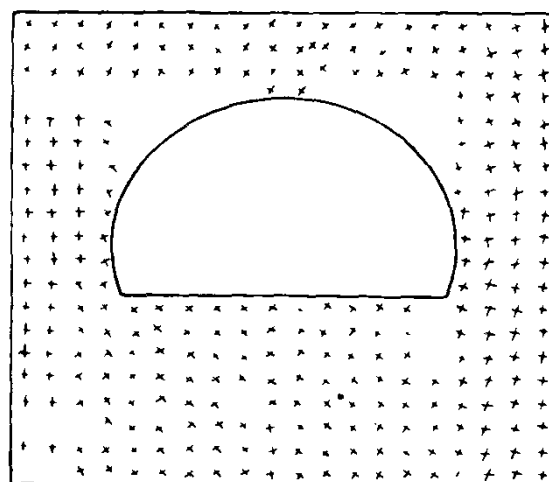


图 6 隧道围岩应力分布

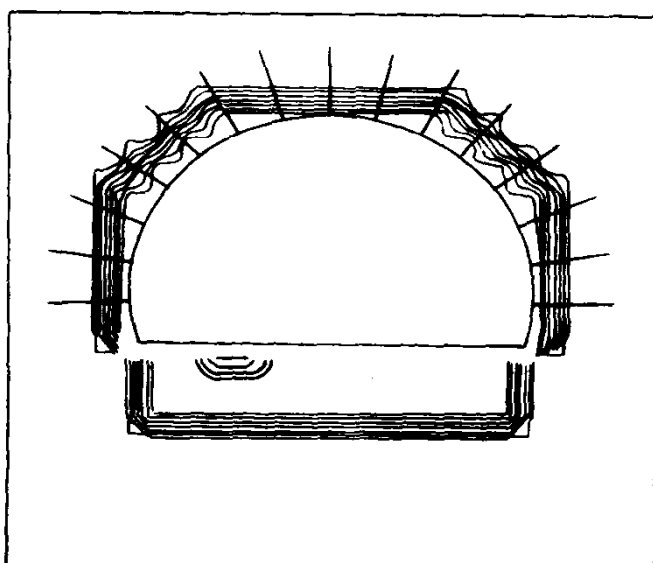


图 7 隧道围岩塑性区分布

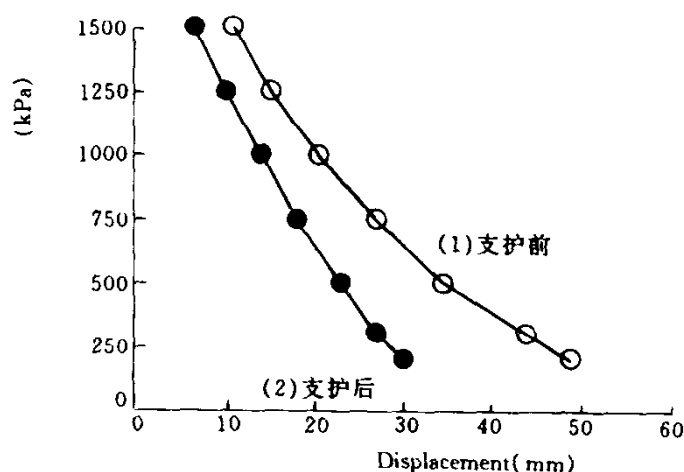


图 8 隧道支护压力和拱顶位移关系，即收敛曲线

4.3 隧道围岩收敛曲线分析

图 8 显示预测的隧道在初期支护前后支护压力和拱顶位移的关系曲线。FLAC 分析结果包括利用作用在整个开挖隧道周边上的一系列径向均布支护压力导出岩体的收敛曲线。由图 8 可知，因用于模拟岩体的基本模型是理想弹塑性，支护压力随拱顶位移增加而连续减少。比较锚杆支护前后的收敛曲线可知，在发生同样的拱顶位移时，锚杆支护后隧道围

岩所需的支护压力小于锚杆支护前的支护压力，且两者的差别随所发生的拱顶位移的增加而增加。这清楚地表明对中等强度的围岩来讲，初期喷锚支护可明显改善围岩的受力和变形状态，并减少二期支护提供的支护压力。

5 主要研究结论

本文的研究紧密结合京珠高速公路粤境北段软弱围岩隧道工程地质和支护设计特点，应用有限差分数值方法（FLAC）模拟了软岩隧道受力变形特征和围岩收敛曲线，研究一次（初期）支护中系统锚杆的作用机理及作用效果，主要结论如下：

（1）通过对某隧道开挖与支护建立的 FLAC 数值计算模型和模拟的计算结果可见，FLAC 方法擅长模拟诸如软弱围岩隧道等连续体非线性大变形问题。模型稳定平衡分析结果表明，最大不平衡力在循环计算 4000 多步后趋于收敛容许范围内（一般小于 100Pa），此时，隧道拱顶垂直位移、水平应力和垂直应力最终趋于稳定值，达到稳定平衡。

（2）隧道围岩位移场与应力场分析结果表明，预测的最大位移均发生在隧道拱顶。对中等强度围岩地段，预测的最大位移在数毫米至数十毫米之间，隧道周围塑性屈服带范围发生在隧道附近围岩中，岩石锚杆延续穿过松弛岩体且有一定长度锚固在“未扰动”的岩体中。所有地段隧道围岩应力在拱脚和 45°拱腰处发生集中现象，由于隧道开挖引起围岩应力重分布，致使隧道周边切向应力大于径向应力。

（3）隧道围岩收敛曲线分析结果表明，若不考虑围岩流变变形的影响，支护压力随拱顶位移的增加而连续减少。发生同样的拱顶位移时，锚杆支护后隧道围岩所需的支护压力小于锚杆支护前的支护压力，且两者的差别随所发生的拱顶位移的增加而增加。这清楚地表明对中等强度的围岩来讲，初期喷锚支护可明显改善围岩的受力和变形状态，并减少二期支护提供的支护压力。

6 参考文献

- 1 软弱岩层中大跨度隧道的初期支护设计. 隧道及地下工程. 1998. No.3. pp1~14
- 2 孙钧. 地下结构. 北京: 科学出版社, 1991
- 3 康红普. 回采巷道锚杆支护影响因素的 FLAC 分析. 岩石力学与工程学报. 1999. No.5. pp534~537
- 4 杨林德等. 复合支护实用计算方法的研究. 同济大学地下建筑与工程系研究报告, 1995
- 5 C. Fairhurst. FLAC Basics. Itasca Inc., 1993

岩石锚固技术理论与实践

于学敏，蔡美峰，宋存义

(北京科技大学，北京 100083)

摘要：本文论述了岩土开挖工程围岩稳定维护方法的一次革命——锚固技术。介绍了锚固技术在龙烟铁矿和金川有色金属矿山的应用，以及岩土开挖工程围岩稳定性的信息计算方法和信息监测方法。

关键词：岩土工程；锚固技术；理论；实践

1 锚固技术的出现是岩土开挖工程围岩稳定维护方法的革命

传统开挖工程围岩稳定性维护方法是以支柱、支架支撑围岩防止塌落为原理的被动方式维护的方法。锚固技术则是以提高围岩自身强度（坚固性）为原理的主动方式维护围岩稳定性的方法。提高围岩强度是指提高岩体抗拉强度、弹性模量、黏结系数、内摩擦角、泊松比等物理参数。所以说锚固技术的出现是一场岩土开挖工程围岩稳定维护方法的革命。

2 锚固技术在龙烟铁矿的应用

50年代，龙烟铁矿在房柱采矿方法中采用了锚固技术，矿房宽为40m，采场倾斜长度为60m，采高为2.5~3m。传统支护方法是用木柱支撑顶板，每根支柱质量都有几十千克，这种支柱的运输和采场施工都十分不便。

但采用锚固技术，其结构属于组合式的，最初采用金属端部锚固式锚杆，其结构是零件组合式的。无论运输或采场施工，都比较方便。所以很快受到施工人员的欢迎，也容易推广。

以后由端部锚固发展到全长锚固。这种方法需要向钻孔内注入水泥砂浆，对维护顶板稳定更为可靠。但是向孔内注入砂浆比较困难，也难以保持工程质量，于是，又改用北京煤炭科学研究院提出来的全长压缩木锚杆，这种锚杆是把木材经过加热、加压处理，使之具有遇潮、遇水膨胀的特点，因而在现场可发挥全长锚固的作用，所以也受到操作人员的欢迎。

用这种技术可以把顶板最大位移量控制在20cm以内。超过此值，采场处于危险状态，需要采取其他措施处理。

3 金川支护与地压来源

1979~1993年间，北京钢铁学院教师、研究生37人参加了金川资源综合利用国家攻