

隧道工程监测和 信息化设计原理

王建宇 编著

中国铁道出版社

1990年·北京

除，另一方面使力学计算具有一定的实际背景。

为了探求能在隧道工程中实施的监测技术和信息化设计方法，近年来，本书作者和他的同事们一起，就施工监测中量测项目的规划、测试手段和工具、量测数据处理以及量测信息的反馈等方面进行了一系列的研究工作和现场试验，提出了工程监测实施方法和信息化设计流程以及相应的电算程序，并在若干隧道的修建中使用，取得了较好的效果。本书是在总结有关试验研究成果的基础上写成，旨在向隧道工程师们较为全面地介绍隧道工程监测技术，阐明信息化设计的基本原理。

必须指出，隧道工程监测和信息化设计技术本身尚须在工程实践中不断加以完善。特别是用于信息化设计的某些计算方法和计算程序的有效性和实用性，还有待于在实际工程中进一步使用加以证实。从这一点出发，本书力图起到抛砖引玉的作用，这正是作者的意愿所在。

作 者

1988年于成都

内 容 提 要

本书根据近年来在隧道工程量测项目的规划、测试手段和工具、量测数据处理以及量测信息的反馈等方面的试验研究成果,提出了工程监测实施方法和信息化设计流程以及相应的计算程序,阐明了信息化设计的基本原理。

读者对象:从事地下工程设计、施工、科研的工程技术人员及有关专业大专院校师生。

隧道工程监测和信息化设计原理

王建宇 编著

中国铁道出版社出版

(北京市东单三条14号)

责任编辑 刘启山 封面设计 翟达

中国铁道出版社发行 各地新华书店经售

北京顺义燕华营印刷厂印刷

开本: 850×1168mm1/32 印张: 5.25 字数: 136 千

1990 年 11 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数: 1—1200 册

ISBN 7-113-00917-4/TU·204 定价: 3.25 元

前 言

同一般的地面工程结构物不同，隧道围岩支护系统环境条件的数量化表达是十分困难的。按现行设计方法对支护系统进行设计计算时，所采用的表征围岩性态和地质背景的各项参数，严格说来并不能在精确的意义上反映实际情况。

进一步说，由于地下工程支护系统工作环境的复杂多变和理论上的不完善，目前还找不到一种计算模型，全面、合理地表达各种情况下支护系统和围岩之间的相互关系和支护系统的工作条件。事实上，1979年国际隧协（ITA）所归纳的“荷载—反力”、“收敛—约束”以及“连续”等三种设计计算模型都有一定的局限性和特定的适用条件。

因此，对于隧道工程，要想如同对地面工程结构物那样，主要通过力学计算来进行设计是困难的。正因为这样，人们往往不得不求助于带有某些主观臆断的经验方法。

同围岩紧密结合的锚杆和喷混凝土一类新型支护的采用，以及以锚喷支护为主要技术背景的“新奥法”的推行，提供了在隧道开挖过程中及时对围岩变形进行监测并通过这种监测对围岩稳定性作出判断的可能性。信息化设计的概念就是在此基础上形成的。

信息化设计意即通过施工过程中所量测到的围岩变形数据来调整 and 确定支护参数，进行相应的施工决策。对于具体工程，首先通过施工前所进行的地质调查和岩土力学试验，用工程类比的经验方法对支护系统进行“预设计”，然后进行施工监测。监测所获得的信息的反馈”则是通过经验和力学计算两个途径来实现的。因此，可以认为：信息化设计一方面使经验方法中所包含的某些主观臆断因素能得以消

目 录

第一章 隧道工程中的现场量测技术	(1)
第一节 现场量测在隧道工程中的地位	(1)
第二节 隧道工程现场量测的几种主要手段	(4)
第三节 位移量测的项目和手段	(19)
第四节 现场量测的规划	(40)
第二章 量测数据处理	(47)
第一节 数据处理的目的	(47)
第二节 各种量测数据的相互印证	(48)
第三节 围岩变形空间分布规律的探求	(56)
第四节 围岩变形或应力状态随时间的变化规律—时态曲线	(64)
第五节 测试数据的回归分析	(65)
第六节 变形测得值和全变形	(78)
第三章 量测结果的运用	(80)
第一节 初始地应力和围岩变形模量的反分析	(80)
第二节 櫻井方法	(83)
第三节 位移联图反分析	(85)
第四节 边界元法在反分析计算中的运用 及DSBEM 程序	(87)
第五节 反分析技术的发展动向	(101)

第六节	反分析技术的实用化研究	(103)
第七节	围岩中塑性区范围的估算	(115)
第八节	时间效应引起的围岩变形和岩体流变参数的反分析	(127)
第九节	二次支护受力条件的反分析	(142)
第十节	采用经验方法实现量测信息对隧道设计施工的反馈	(149)
参考文献		(157)

第一章 隧道工程中的现场量测技术

第一节 现场量测在隧道工程中的地位

在隧道开挖的过程中，可以使用各种类型的仪表和工具，对围岩和支护系统的力学行为以及它们之间的力学关系进行量测。这类量测常被称为“现场量测”，亦称“原位观测”。

与一般工程测试相比，隧道工程中的现场量测具有特殊重要的作用。而对这一点并不是所有的人都认识到了。诚如著名岩石力学专家米勒（L·Müller）所说，“在岩土工程，特别是在隧道工程中变形量测的重要性尚未被很多人所认识。有些人把很重要的监测过程看成是仅仅为了满足科研的奢望偶而使用一下的时髦。同这种观点相反，对岩土结构，特别是对隧道的形态所进行的量测已被证明，其重要性犹如对钢结构和混凝土结构所进行的静力计算一样。”^[1]

地面结构工程的修建一般采用较为单纯的“调查—设计—施工”流程。而设计的主要手段则是从“荷载—结构物”模型出发而进行的力学计算。

在隧道工程中，支护系统同围岩之间呈现着错综复杂的关系，这种关系并不总是能用“荷载—结构物”这样一种力学模型加以概括的。特别是在采用与围岩紧密结合的锚喷支护、按新奥法原则修建隧道的情况下，“荷载—结构物”模型显然不能正确地描述围岩和支护系统之间的相互关系。

国际隧协（ITA）隧道结构设计模型工作组曾针对不同条件的隧道工程把设计支护系统时所采用的力学计算模型归纳为以下三种^[2]：

(一) “荷载-反力”模型。我国自50年代以来在衬砌计算中大多采用这种模型;

(二) “连续体”模型。这种模型把支护手段视为岩石介质的某种力学边界条件。有限元、边界元一类数值方法在岩土工程计算中的推行为采用这种模型创造了条件;

(三) “收敛-约束”模型。这种模型根据围岩和支护系统的变形特征(特征曲线),通过二者变形的协调条件来对围岩稳定性和支护系统的静力工作条件进行计算。

在很多情况下,要确定采取以上三种模型中的哪一个较为合适并不容易。而一旦计算模型得以确定,计算所需的各项输入信息的采取(例如岩体本构关系及特性参数、初始地应力、支护特性参数等)就成为问题的关键。输入信息不正确会使这种计算得出同实际不相符合的结论,甚至面目全非,毫无意义。围岩是一种处于形形色色地质背景中的,多相的,不连续的复杂介质。力学计算所需的输入信息的获得,仅仅依靠施工前的一般地质调查和室内岩石力学试验是难以做到的。这就使得仅仅依靠力学计算来设计支护在很多情况下成为不可能。

因此,目前在隧道工程的设计中我们常常不得不把建立在围岩工程分级基础上的工程类比的经验方法作为一种重要手段。

事实证明,单独地孤立地使用力学计算方法或经验方法都不能取得较好的效果。片面强调其中某一种手段而排斥另一种也是不正确的。为了选择一条隧道工程设计的正确途径,一方面要使经验方法科学化;另一方面则要使设计中所进行的力学计算具有实际背景。

为了做到这一点,现场量测就不能不起到特别重要的作用。可以把隧道开挖后围岩和支护系统力学形态的变化动态作为判断围岩稳定性和支护系统可靠性的依据,把施工监测所获得的信息加以处理,与工程类比的经验方法相结合,建立一些必要的判断准则,借以直接利用量测结果(经处理)及时地调整、确定支护参数或进行施工决策。

实现量测信息对隧道设计和施工的反馈的另一条途径，是利用力学计算作为媒介。

一般地说来，如果表征某一系统力学属性的各项初始参数是确定的，那么，该系统的力学行为也随之确定。反之，如果我们能通过现场量测获得反映该系统力学行为的某些物理量，那么，从理论上说，可以通过力学计算反推该系统的各项初始参数。这就是岩土参数的所谓“反分析”技术。利用反分析技术，我们有可能根据对试验段或试验洞进行现场量测所得到的数据（例如围岩表面某些测点上的位移值或在某一基线上的净空变化值）推算表征围岩性态及其地质背景的初参数，作为对该隧道围岩稳定性进行分析，对支护系统进行设计计算时的输入信息。

显然，用反分析技术所得到的这种参数，与隧道施工前的一般地质调查和有限的室内岩土力学试验所提供的结果相比较，更能全面、真实、概括地反映围岩性态，据以进行力学计算则容易得出较为接近实际的结果。

通过在隧道施工过程中所进行的现场量测获得关于围岩稳定性和支护系统工作状态的信息，然后将这种信息反馈于施工决策和支护系统的设计，这种过程可以称为“施工监测”和“信息化设计”，国外称 *Observational Method*，日本人称“情报化施工”。

通过图1—1，我们可以看到，以施工监测、力学计算以及经验方法相结合为特点，建立了隧道工程特有的修建程序。同地面工程不同，在隧道工程修建过程中，调查、设计、施工等诸环节允许有交叉、反复。在初步地质调查的基础上根据经验方法或通过力学计算进行预设计，初步选定支护参数。然后，还须在施工过程中根据监测所获得的关于围岩稳定性和支护系统静力工作状态的信息，对施工过程和支护参数进行调整。施工实例表明，对于设计所作的这种调整和修改是十分必要和有效的。

以施作及时、同围岩结合紧密并具有一定柔性的锚杆—喷混凝土

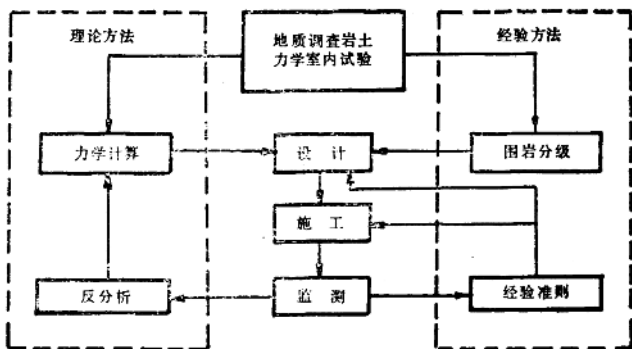


图1—1 施工监测和信息化设计流程

支护的使用为技术背景所发展起来的“隧道工程新奥地利法”(NATM)的主要原则是:隧道修建过程中安全条件的获得和隧道在使用中安全度和工程质量的保证,主要应立足于围岩自身通过应力调整所建立的平衡。支护系统的作用则在于提供一个适当的力学边界条件,促使这种应力调整过程的完成和平衡的建立。

因此,采用新奥法原则修建隧道时,施工中对围岩应力调整过程和围岩变形情况进行监测更是必不可少的。事实上,开挖方法的确定、锚杆的布置、锚喷支护参数的确定、二次支护施作时间的选择都有赖于施工监测。因此,一般把施工监测和锚杆、喷混凝土一起称为新奥法“三要素”。本书着重以采用新奥法修建的隧道工程为对象,介绍隧道施工监测技术和信息化设计原理。

第二节 隧道工程现场量测的几种主要手段

一、围岩与衬砌之间接触应力的量测^[3]

在我国,早在五十年代,就有人在隧道衬砌背后埋设压力盒,量

测衬砌所承受的“山体压力”，亦即衬砌同围岩之间的接触应力。诚然，这种接触应力的量值和分布形态除了同围岩特性有关外，在很大程度上取决于衬砌和围岩之间的接触条件（如回填情况等）。以往国内常采用钢弦式压力盒（图1—2）。

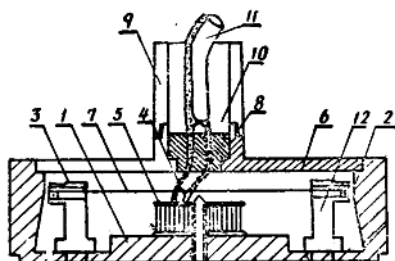


图1—2 G124—7型钢弦压力盒

- 1——量测薄膜；2——底盘；3——钢弦夹紧装置；4——铁芯；5——线圈；
6——封盖；7——钢弦；8——塞子；9——引线套；10——防水材料；
11——电缆；12——钢弦支架。

这种压力盒的底面承受压力时，发生变形，引起钢弦伸长，通过量测钢弦振动频率来了解压力值。以图1—2所示的G124—7型钢弦压力盒为例，其钢弦同承压薄膜平行，膜愈薄灵敏度愈高，而其工作压力极限相应降低。这种压力盒1962年以来已在不少隧道中使用。其作用稳定可靠，工作压力最大0.7MPa，压力变化0.01MPa时频率变化17Hz。使用5个月后再行标定，误差仅 $\pm 0.01 \sim 0.02$ MPa。这种压力盒埋设10年后仍可进行正常观测。

近年来，还采用一种油腔压力盒（国外称Glözel压力盒）来量测接触应力^[4]。这种压力盒直接通过量测一个扁平的油腔中的油压的大小来了解接触应力的大小。压力盒埋设后，有一根与压力盒油腔相连通的紫铜管伸出衬砌外，油腔出口有一逆止阀，防止油外溢。量测时将外伸紫铜管同一泵站相连，通过泵站向紫铜管泵入压力油，当油压升至同压力盒油腔的油压相等时，逆止阀开启，回油，系统油压不再上

升，此时读得的泵站油压即为油腔压力，见图1—3及图1—4。

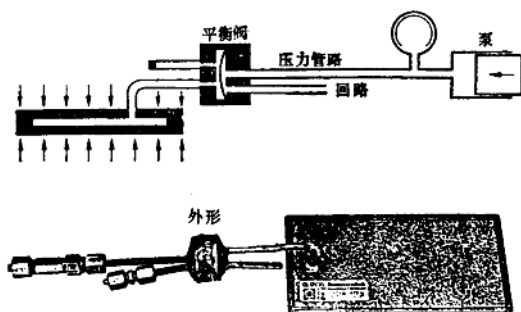


图1—3 油腔压力盒

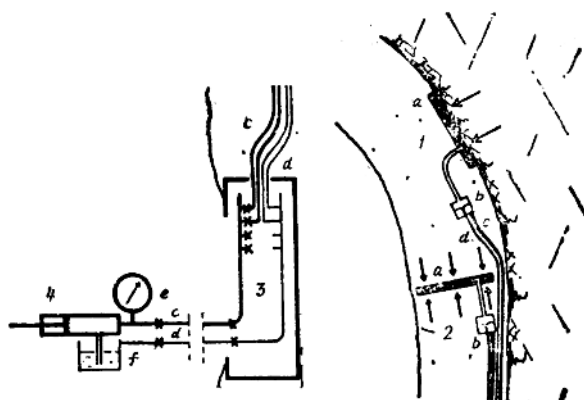


图1—4 利用油腔压力盒进行量测

- 1——径向压力盒；2——切向压力盒；3——连接装置；4——压力泵。
a——盒体；b——平衡阀；c——压力管路；d——回油；e——精密压力表；f——液体容器。

油腔压力盒，直接在泵站测读油压，测得数据比较可靠。同时，与钢弦式压力盒不同，这种压力盒有可能做得十分扁平，埋设容易，

有利于改善传感性能，减少局部应力集中对量测结果的影响，被认为是最好的压力传感器。

美国IRAD公司还生产一种油腔压力盒，通过一个同油腔连在一起的钢弦应变计来测定油压。

很长一段时间内，我国隧道工程中的现场量测是以上述接触应力为重点的。这同当时在隧道工程中主要采用传统支护技术和模注混凝土衬砌，而在设计计算上则主要采用“荷载-反力”模型有关。根据这种计算模型，人们的注意力自然会集中在通过量测寻找作用在衬砌“结构”上的“荷载”。

60年代中期，锚杆-喷混凝土支护开始在我国推广。人们发现“荷载-反力”模型和松动压力理论不能很好地说明这种新型支护形式的作用实质，亦不能借以进行设计计算。于是期望通过对围岩应力-应变状态的量测，了解围岩的稳定性和支护系统的安全度。

二、围岩应力-应变量测

可以在围岩中钻孔，埋设各种类型的应变计或应力计，再往孔中灌注水泥砂浆，然后测读应变计，了解围岩的应力-应变状态。现将隧道工程量测中常用的应变计（应力计）简要介绍如下：

（一）钢弦式应变（应力）计^[5] 钢弦的应变和其振动频率有下列关系

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E\varepsilon}{\rho}}$$

式中 f ——钢弦的振动频率；
 l ——钢弦的长度；
 E ——钢弦的弹性模量；
 ε ——钢弦的应变值；
 ρ ——钢弦的密度。

图1—5所示为国内使用的一种钢弦式应变计。量测时可采用国产GPS-1型频率计或JD-5型周期仪作为接收器。钢弦式应变计的主要特点是性能稳定，耐久性好，不受接触电阻等因素的影响。

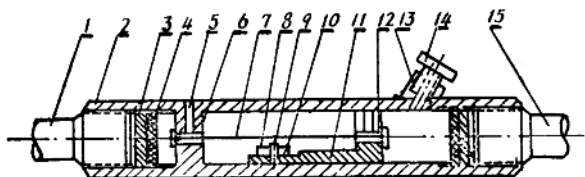


图1—5 钢弦式应变计

- 1——拉杆；2——壳体；3——端封板；4——橡皮垫；5——定位螺丝；
6——夹线柱；7——钢弦；8——线圈架；9——铁芯；10——线圈；
11——支架；12——支承堵头；13——密封圈；14——引线嘴；15——拉杆。

(二) 差动电阻式应变计 南京水工仪器厂生产。该应变计中装有两个相互交叉的电阻（图1—6）。

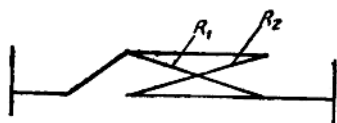


图1—6 差动电阻式应变计原理图

如图1—6所示，当应变计产生一拉应变时，阻值 R_1 上升， R_2 下降， R_1/R_2 上升；产生压应变时则相反。可以用一个比例电桥来测定电阻比 R_1/R_2 。用于推算应变时还要考虑消除温度变化的

影响。温度变化的影响通过测定电阻值($R_1 + R_2$)来确定的。计算公式为：

$$\varepsilon = f(Z - Z_0) + b\alpha(R - R_0)$$

式中 $Z = R_1/R_2$;

$$R = R_1 + R_2;$$

Z_0 ——初始条件下的电阻比；

R_0 ——初始条件下的电阻值；

f, b, α ——通过标定得出的常数。

使用应变计量测围岩应力-应变实例：

1. 皖赣线下坑隧道为一单线铁路隧道，穿越严重风化、破碎的千枚岩地层，最大埋深仅20m^[6]。曾在地面钻孔埋设钢弦式及差动电阻式应变计（图1—7）。

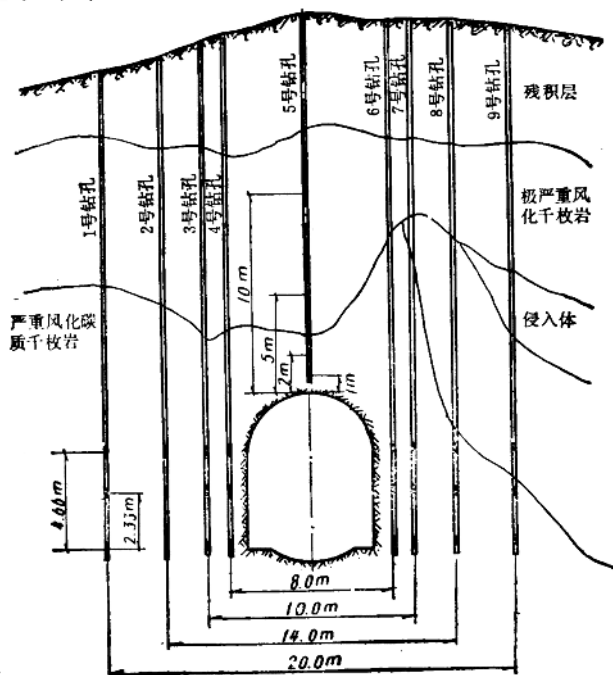


图1—7 下坑隧道应变计布置图

图1—8及图1—9所示分别为用应变计量测到的边墙部位围岩中切向应变和拱顶部位围岩中径向应变随开挖面向前延伸而产生的变化。

2. 用应变计（应力计）进行量测的另一个成功的实例是用差动电阻式应变计和钢筋应力计在衡广复线南岭隧道特浅埋段进行围岩稳

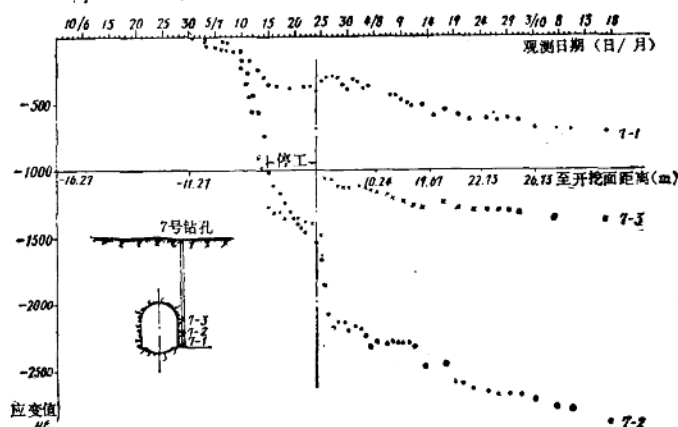


图1—8 边墙部位围岩中切向应变测量结果

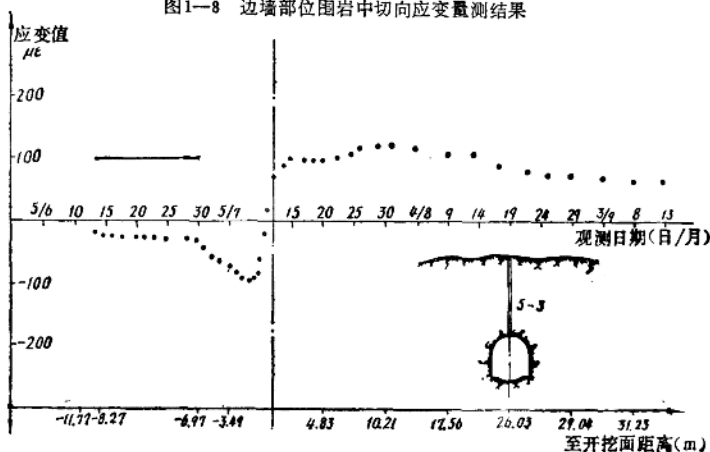


图1—9 拱顶部位围岩中径向应变测量结果

定性观测^[7]。该隧道段通过风化严重的砂页岩互层，地表为一个马鞍形的低洼地，该处隧道埋深仅为6.5~8.1m。隧道跨度约12m，高近10m。



在隧道开挖前先从地表钻孔安装砂浆锚杆作为一个主要的支护措施。为了了解隧道开挖过程中锚杆受力情况，并对围岩稳定性进行监视，在锚杆中焊入应力计。此外，还通过地表钻孔埋入应变计(图1—10)。

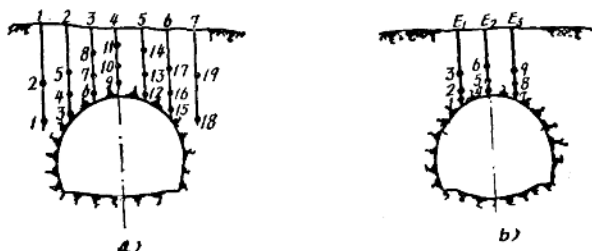


图1—10 南岭隧道应力计和应变计布置图

a) 焊在杆体中的应力计; b) 通过钻孔埋入的应变计。

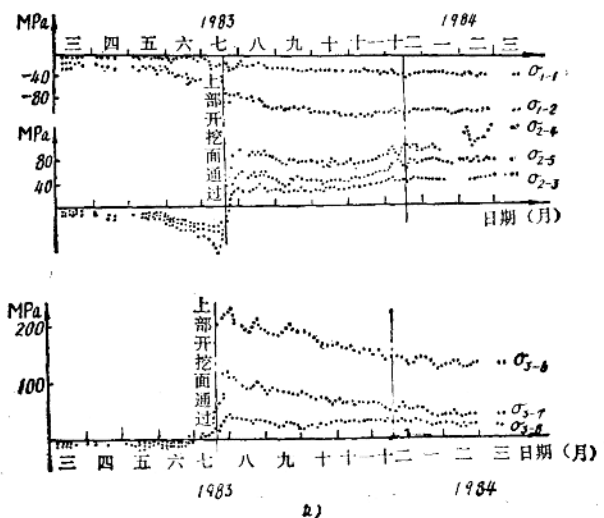


图1—11 a) 1~3号锚杆