

地下工程新奥法

韩瑞庚 编著

地下工程新奥法

韩瑞庚 编著

内 容 简 介

新奥法是一种新的地下工程设计施工技术,受到了世界各国地下工程界的普遍重视,目前正处于蓬勃发展阶段。

本书较为全面、系统地介绍了新奥法的基本理论、设计、施工、量测、掘进方式和支护手段等内容,并列举了部分有代表性的实例供读者进行工程类比时借鉴。

本书可供国防、人防、铁路、公路、地铁、煤炭、冶金、电力、石油及市政建设等部门从事地下工程方面的科技人员参考。

地下工程新奥法

韩瑞庚 编著

责任编辑 杨家福

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1987 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1987 年 6 月第一次印刷 印张: 9 5/8

印数: 0001—2,700 字数: 219,000

统一书号: 15031·822

本社书号: 4367·15—1

定价: 2.30 元

目 录

第一章 新奥法概念.....	1
第一节 基本概念和定义	1
第二节 发展和应用概况	2
第三节 优越性	4
第四节 新奥法与喷锚支护的关系	5
第二章 新奥法理论.....	8
第一节 基础理论——隧道围岩的力学性质	8
第二节 支护结构设计理论	17
第三章 新奥法设计与施工.....	35
第一节 设计方法	35
第二节 施工程序	38
第三节 著名隧道设计	42
第四节 日本国铁新奥法设计标准草案	48
第五节 设计施工中存在的问题与对策	54
第四章 新奥法量测.....	65
第一节 量测在新奥法设计施工中的意义和作用	65
第二节 量测项目	66
第三节 隧道内目测观察	69
第四节 隧道壁面间水平变位量测——内空变位量测	73
第五节 锚杆拉拔抗力量测	84
第六节 围岩内变位量测	91
第七节 锚杆轴向力量测	96
第八节 一次被覆喷混凝土层径向压应力和轴向压应力量测	101
第九节 监测隧道稳定状态的量测	105

第十节 量测工作的组织实施	106
第五章 新奥法的掘进	107
第一节 开挖方式	107
第二节 爆破方法	114
第三节 ABS 爆破法	119
第六章 新奥法的主要支护手段——喷混凝土结构	128
第一节 喷混凝土	128
第二节 水泥造壳砂浆喷混凝土——SEC 喷混凝土	136
第三节 钢纤维喷混凝土	149
第四节 金属网、钢拱支架	151
第七章 新奥法的主要支护手段——锚杆	156
第一节 锚杆的支护机理和配置设计	157
第二节 端部锚固式锚杆	162
第三节 全部粘附式锚杆	165
第八章 混凝土二次被覆和防水层	180
第一节 混凝土二次被覆	180
第二节 防水层	186
第九章 一次被覆结构的简化计算	190
第一节 一次被覆结构对围岩的总承载力	191
第二节 计算实例	200
第十章 新奥法设计施工实例分析	205
第一节 坚硬岩石中的隧道——日本羽越本线宫名隧道 ...	205
第二节 沼泽地下面的隧道——日本智头线高仓山隧道 ...	218
第三节 膨胀性地层中的隧道——日本北越北线锅立山隧道	237
第四节 土砂质地层中的隧道	247
第十一章 新奥法的展望	272
第一节 预支护的作用	272
第二节 在膨胀性地层中采用新奥法	285
参考文献	294

第一章 新奥法概念

第一节 基本概念和定义

新奥法 (New Austrian Tunnelling Method——NATM) 是六十年代奥地利专家 L. V. Rabcewicz 总结前人在隧道工程中累积的经验后所提出来的一套隧道设计、施工的新技术。

新奥法摒弃了传统隧道工程中应用厚壁混凝土结构支护松动围岩的理论,把岩体视为连续介质,在粘、弹、塑性理论指导下,根据在岩体中开挖隧道后从变位产生到岩体破坏要有一个时间效应的性质,适时地构筑柔性、薄壁、能与围岩贴紧的支护结构来保护围岩的天然承载力,变围岩本身为支护结构的重要成分,使围岩与构筑的支护结构共同形成为坚固的支承环,共同形成一个长期稳定的洞室。新奥法所采用的主要支护手段是喷混凝土结构和锚杆。

新奥法构筑隧道的主要特点是通过许多量测手段对开挖后隧道围岩的动态进行监测,并以此来指导隧道支护结构的设计和施工。

新奥法的理论是建立在岩石的刚性压缩特性和岩石的三向压缩应力应变特性以及莫尔学说基础上的,并考虑到隧道掘进时的空间效应和时间效应所提出的新理论。这一新理论集中体现在支护结构种类、支护结构构筑时机、岩压、围岩变位这四者的关系上,贯穿在不断变更的设计施工过程中。这一新理论提出了与传统方法完全不同的新概念和新观点,它指导着喷锚支护的设计和施工,指导着构筑隧道的全过程。

多年来一直没有给新奥法下过确切的定义。1980年,奥地利土木工程学会地下空间利用分会把新奥法定义为:“在岩质、土砂质介质中开挖隧道,以使围岩形成一个中空筒状支承环结构为目的隧道设计施工方法。”为使围岩形成中空筒状支承环结构,应遵循下述原则:

(1) 应当考虑岩体的力学特性。

(2) 应当在适宜的时机构筑适宜的支护结构,避免在围岩中出现不利的应力应变状态。

(3) 为使围岩形成力学上十分稳定的中空筒状支承环结构,必需构筑一个闭合的支护结构。

(4) 由现场量测监控围岩动态,根据容许变形量求得最适宜的支护结构。

新奥法的这个定义扼要地揭示了新奥法最核心的问题——利用围岩支护隧道,使围岩本身形成支承环。

第二节 发展和应用概况

新奥法发展到现在,在理论方面大致可归纳为下面几个发展阶段。

(1) 1964年至1969年。

从理论上分析了在岩压影响下隧道的破坏过程,阐明用薄壁柔性支护结构支护隧道的合理性,提出早期形成支护结构的闭合断面对保证隧道安全与稳定的重要性,批判了厚壁支护结构;提出了锚杆与喷混凝土支护结构是加固围岩的重要手段;提出了通过量测隧道的内空变位数值来判断支护效果,判断隧道的安全性和稳定性的问题。

(2) 1969年至1975年。

在支护结构设计理论上提出了按受剪破坏条件来进

行计算的原则,并提出为了保护围岩天然承载力,支护结构应当与围岩贴紧,以便能及时地和有效地对围岩施以约束压力。

(3) 1975 年至今。

主要探求了用有限元法解决隧道设计的数解法问题。目前,各国岩体工程界对数解法的研究很活跃,但因地质情况复杂,影响施工的因素很多,使得这方面的研究成果还不能成为新奥法设计的依据,而只能作为分析问题的参考。

新奥法理论虽然还很年轻,还有许多问题有待逐步去完善,但是,由于它能更正确地反映岩体力学性质的实质,所以具有很强的生命力。由于新奥法具有许多优点,目前已引起了世界许多国家的重视,并得到了相应的推广应用。特别是日本,为了迅速的引进这一新技术,有不少部门都专门设立了有关机构来开展这方面的研究和推广应用,经过 1976 至 1978 年三年的试验施工后,于 1979 年开始正式推广应用新奥法。现在,在日本的隧道工程中新奥法已占据了主导地位。截至目前,日本应用新奥法构筑的隧道已近百座,总长达 50 余公里,这些隧道的岩质条件也是非常复杂的,包括土砂质地层、膨胀性地层、软弱破碎岩体、硬岩、中硬岩等。在日本,已建隧道的数量之多,地质条件的复杂程度已远远超过奥地利,在新奥法方面所取得的成就和经验有很大的参考价值。

美国隧道界对新奥法也给予了足够的重视,纽约地下铁隧道已决定采用新奥法构筑。据报道,若按美国惯用的钢拱架与厚壁混凝土被覆来计算,纽约地铁隧道的单位造价是 700 美元/米,而按新奥法施工来计算,单位造价只有 200~300 美元/米;由此可见,所降低的单位造价是很可观的。

世界上其他一些国家应用新奥法设计施工的隧道截止 1978 年以前也已有几十条之多。

第三节 优越性

利用新奥法构筑隧道的适用范围是很广泛的。

就所适用的隧道种类来讲，从铁路隧道、公路隧道、城市地下铁、地下贮库、地下厂房一直到水电站输水隧洞、矿井井巷等都可以采用新奥法构筑。就应用新奥法构筑隧道的跨度来看，在双线铁路隧道及双线公路隧道的构筑中，其跨度已达10米左右，而在水电站发电机组厂房隧道的构筑中，隧道跨度已达30米左右。从所构筑隧道的埋深来讲，由覆盖层为几米至1000米的都有，就隧道所处位置上面的地面状况而言，从山岭隧道到城市隧道都可以应用新奥法构筑。从地质条件来讲，由坚硬岩、软岩、土砂质地层中的隧道，一直到具有强大膨胀性地压的地层中的隧道，都可以用新奥法构筑，特别是在膨胀性地层和在软弱的土砂质地层中，采用新奥法可以有效地克服塌方事故。在城市地下工程中，采用新奥法可以成功地控制地表下陷，如慕尼黑地下铁应用新奥法构筑，把地表下陷量成功的控制在5~10毫米的范围内。

采用新奥法构筑隧道可以使围岩与支护结构共同工作，最大限度地发挥了围岩本身原有的支承能力，这是新奥法独到的优点。

新奥法施工过程中，通过量测手段来掌握围岩稳定状态，发现情况可以即时采取措施，因而可以保证安全施工。在隧道长期使用过程中，还可以通过经常性量测来预测和监视隧道的稳定状态。

与传统的钢拱架厚壁混凝土支护体系相比，新奥法支护结构是以锚杆、喷混凝土、可缩可屈性钢拱架等材料构成的薄壁柔性的支护结构。薄壁柔性结构是在受剪状态下工作，而

旧的厚壁结构则是在受弯状态下工作；前者可以充分利用混凝土的抗剪强度，大幅度降低了材料用量。另外，由于薄壁衬砌，开挖石方量也大大减少。因此，采用新奥法具有省人力、省资源、成本低等优点。

在新奥法施工中，不论采用全断面开挖，还是采用分台阶开挖，使用喷混凝土、锚杆或钢拱架构筑的临时支护结构就是永久性支护结构的主要部分，不用拆除，不占有有效空间，因而施工工作面处的作业空间宽阔，便于组织大型机械化施工，可加快施工速度。

传统方法构筑隧道是在凹凸不平的岩层表面构筑防水层，难以得到可靠的防水效果。新奥法的衬砌是通过两次被覆来完成，可以先在一次被覆后的光滑表面上构筑防水层，然后再做二次被覆，从而大大提高防水效果。

在施工过程中，通过对围岩不断进行的量测，可以随时判断出围岩和结构物的安全状态，并据此可以采取临时措施，或变更设计，或变更施工方法，使设计和施工具有极大的灵活性。

第四节 新奥法与喷锚支护的关系

由于新奥法是一门新技术，其基本理论和应用技术尚处于发展之中，很多内容还未被人们所认识和接受，因此有人竟把喷锚支护误认为就是新奥法的全部。实际上，喷锚支护只是一种支护手段，并且新奥法中的喷锚支护手段在理论上也有它自己的独立体系。

从理论上讲，隧道力学理论分成两个体系，一是松动压学派，一是粘、弹、塑性理论学派。

松动压学派是以研究作用于隧道支护结构上的荷载——

松动压为中心来解决支护结构设计问题的。这一学派包括普氏拱理论、K. Terzaghi 理论以及近年来挪威学者 N. Barton 提出的岩质评定系数理论等等。N. Barton 的岩质评定系数理论是根据西北欧二百余例采用喷锚支护的隧道设计施工记录,应用统计分析方法得出如下的公式:

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \times \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \times \left(\frac{J_w}{SRF} \right)$$

式中: Q 为 N. Barton 岩质评定系数; RQD 是根据岩心回采率确定的系数; J_n 为岩体节理组数系数; J_r 为节理面状态系数; J_a 为节理变质状态系数; J_w 为节理含水状态系数; SRF 为因应力影响的岩质下降系数。然后根据算得的 Q 值,从统计图表中求出对应的松动压值和对应的支护结构的组成和参数,这样来设计喷锚支护。

粘、弹、塑性理论学派是以研究围岩中应力再分配为中心来解决隧道支护结构设计问题的。该理论最初是把围岩视为各向同性的连续的弹性介质,发展到现在则把围岩视为粘、弹、塑性的连续介质来研究。在这一学派中,又因解决设计问题的方法不同而派生出两个分支。第一分支是从假定的反映岩石物理力学性质的计算模型出发,用数解法进行支护结构设计;主张这种数解法的有 R. Fenner 和 H. Kastner 等人。第二分支是利用粘、弹、塑性理论的定性成果,着眼于围岩变位的稳定来设计隧道的支护结构,通过现场量测来监视围岩动态;设计支护结构成分和参数分两步进行,第一步先靠经验应用工程类比法来确定初选设计参数,第二步靠现场量测数据来判定围岩变位稳定状态,并据此来修定支护结构的组成成分和参数。

新奥法理论是属于粘、弹、塑性理论学派的第二分枝,因此,没有松动压的概念。

喷锚支护的设计理论则是包含在隧道力学理论的两个学派当中。在苏联,喷锚支护设计是以普氏拱理论为基础,按照悬吊理论,根据把塌落拱内的松动岩体悬吊在塌落拱以外的岩体上的设想来设计锚杆的长度和数量;这种设计理论是属于松动压理论学派。我国和西北欧一些国家是按冲切破坏理论来设计喷锚支护结构,西北欧也有按 N. Barton 岩质评定系数来设计喷锚支护的;这些也是属于松动压理论学派。

新奥法所使用的支护手段中,除了喷锚支护外,还有钢拱支架、U型可缩性支架、钢筋网、二次模注混凝土等,在特殊情况下,还要配合使用注浆加固、冻结加固等特殊手段。所以,喷锚支护只是新奥法构筑隧道的主要支护手段,并且这些支护手段的最终目的是约束围岩变位,使围岩和支护结构共同形成支承环结构。另外,新奥法构筑支护手段的时间效应(见第二章第一节、第二节)和空间效应(见第二章第二节)对形成支承环结构、保障围岩稳定有很重要的意义。

施工经验证明,采用喷锚支护如果忽视时间效应和空间效应,不仅达不到预期效果,甚致会造成工程事故,特别是在岩质条件较差的条件下,这种事故屡有发生。反之,如果重视了时间效应和空间效应,则不论是在膨胀性地层中,或是节理裂隙发育的地层中,或是土砂质地层中,都能成功地构筑隧道,有些采用传统方法构筑而濒于失败的隧道,改用新奥法构筑就取得了成功。

第二章 新奥法理论

第一节 基础理论——隧道围岩的力学性质

一、岩石的残留强度和应变

(一) 单向压缩时岩石的残留强度和应变

近年来,岩石力学方面的一项新成就——岩石刚性压缩试验,为我们解决了认识岩石在超过强度极限后的应力应变状态和强度变化状态的问题,即岩石的残留强度及应变的问题。所以,目前对岩石的残留强度及应变的研究,也就成了岩石力学科领域中的一个很受重视的课题。

过去人们认为,当压应力值超过岩石的强度极限时,岩石就发生脆性破坏。实质上,这种脆性破坏是一种假象,这种假象是由试验设备和试验方法造成的,而采用了刚性压缩试验方法,则可以看到超过强度极限后岩石的应力应变——残留强度及应变状态的全过程。

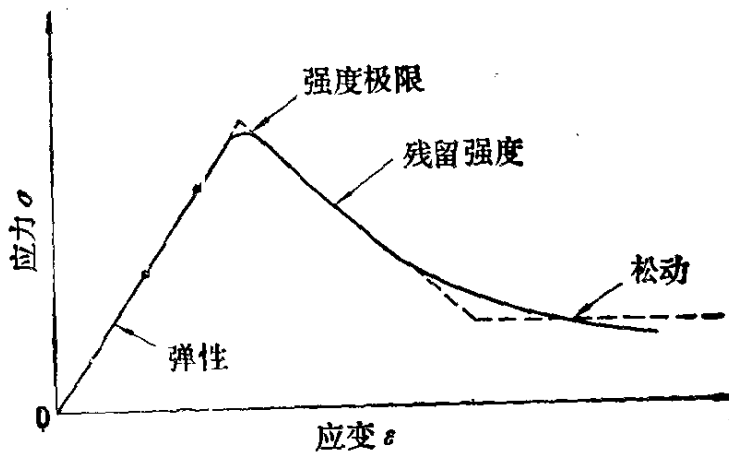


图 2.1 单向刚性压缩岩石应力应变关系

图 2.1 为岩石单向刚性压缩试验的应力应变曲线。

由图可以看出，当岩石中的应力值达到岩石的强度极限以后，即达到了曲线的峰值以后，并不是立即完全失去了抗压强度，而是还残存着一定的残留强度。岩石的残留强度是随着时间的前进伴随应变的发展而逐渐下降的。

岩石的残留强度有一个最低值。如果残留强度达到这一数值时，应变则会无止境地发展。这种无止境增大的状态被称为松动状态。随松动状态的发展，岩体才会发生崩塌现象。

应用普通的压缩试验设备之所以不能看到岩石的残留强度与应变关系，是因为压力机的刚度不够。普通压力机的刚度与岩石试件的刚度相近，当对岩石进行压缩试验时，有很大一部分能量以压力机形变能的形式贮存于压力机内，而当试件达到强度极限后出现强度下降状态时，贮存在压力机内的形变能则突然释放出来。因而，在这样的冲击之下，造成试件的突然破裂，形成脆性破坏。

根据上述的原因，采取加大试验机刚度的办法，对一般不甚坚硬的岩石可以进行刚性压缩试验，由此可以看到这类岩石的残留强度与应变的关系。但对于特别坚硬的岩石，如闪长岩等，单靠加大试验机的刚度还不行，还必须在试件超过强度极限后具有能控制加载数值的伺服控制系统，否则亦看不到岩石试件在超过强度极限后的残留强度与应变的关系。

(二) 三向压缩时岩石的残留强度及应变

通过刚性压缩试验的方法，同样可以得出在三向应力状态下岩石的应力应变关系曲线，如图 2.2 所示。

从图 2.2 可以看出，在三向应力状态下岩石的强度极限和超过强度极限后的残留强度以及应变的变化等，都与封闭自由面的封闭压力(即约束压应力)值有关，即当对单向刚性

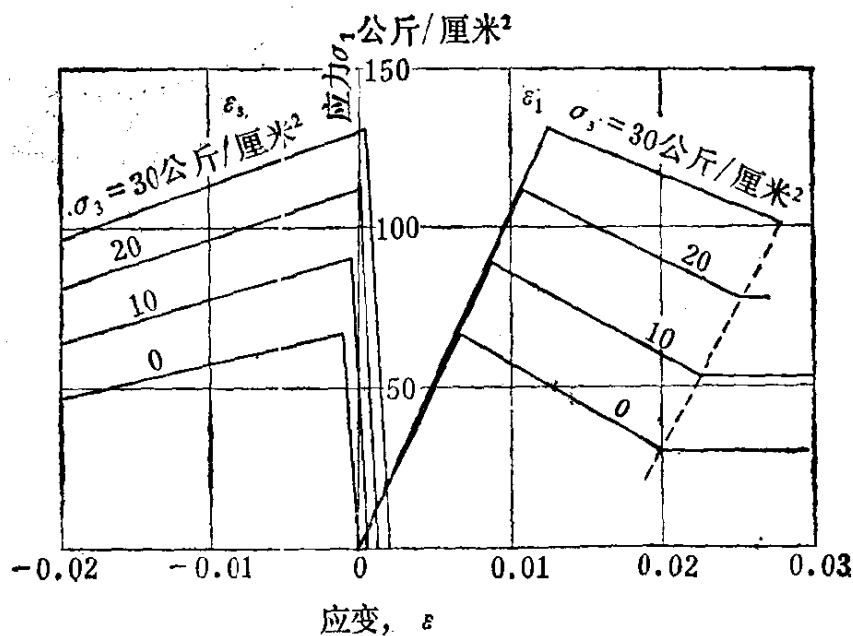


图 2.2 三向刚性压缩岩石应力应变关系

- σ_1 : 压应力(单位面积的加载值)
 σ_3 : 封闭自由面的封闭压力(约束压应力)
 ϵ_1 : 压应力 σ_1 方向上发生的应变
 ϵ_3 : 约束压应力方向上发生的应变

压缩试验的自由面施以不同的约束压应力时，岩石的强度极限都比单向压缩时（约束压应力等于零时）相应地得到提高。对应相同应变值的残留强度值，也都随约束压应力值的提高而提高。出现松动状态的残留强度的最低值，亦随约束压应力值的提高而提高。这些是在低约束压情况下岩石的强度极限、残留强度和残留强度最低值随约束压的变化而变化的状态。

当封闭自由面的封闭压力超过某一临界值时，岩石的残留强度与应变则又表现出另外一种性质，这时岩石残留强度的最低值等于强度极限。

在三向压缩时，最大主压应力 σ_1 与垂直于最大主压应力方向产生的应变 ϵ_3 的关系是， σ_1 之值达到峰值时， ϵ_3 则为拉应变。在低约束压时，当拉应变 ϵ_3 的绝对值超过压应变 ϵ_1 之

值时,岩石中则在垂直于最大主应力 σ_1 的方向上出现微小裂隙。此时岩石发生体膨胀现象,岩石出现压裂破坏。地下开挖后,隧道围岩向净空方向产生的变位并最后出现松动现象,就是这种体膨胀现象所造成的。

从对岩石试件进行刚性压缩试验所看到的岩石的这种性质,为我们提供了可以利用围岩本身的强度极限和残留强度所具有的承载能力来支护隧道的客观条件和依据,为我们提供了由围岩与人工支护结构共同形成环型支承结构来支护隧道的客观依据。

岩石的残留强度及应变关系的这种性质是新奥法的重要基础理论之一。这个理论在新奥法原理中定性地体现为:构筑支护结构要有时间效应的概念,要适时;支护结构应当具有柔性,刚度不必过大;在不出现有害的松动条件下,允许围岩产生一定的变位。

岩石的残留强度及应变是岩石中具有普遍意义的共性,符合隧道围岩的实际工作状态。但是,人们对各种岩石的残留强度及应变参数的定量认识,目前还没有解决。另外,弹性阶段或塑性阶段都能正确反映岩石这些物理力学性质的计算模型如何确定,也是一个很复杂的问题。所以,用解析法定量地解决这样的问题,目前还存在很大的困难。

二、岩体的徐变

随着人们研究隧道力学的深入,岩体的徐变问题已逐步引起了隧道工程界的重视。但是,目前对岩石的徐变特性的定性和定量研究工作比起对金属材料所开展的研究还远远不够。

现就石膏及砂岩的徐变特性试验的结果来探讨岩体的徐变限界以及徐变限界与隧道围岩的应力应变关系。

在恒定压应力作用下，置于水中的石膏的徐变特性可用图 2.3 来表示。图中横坐标为以日为单位的时间坐标，纵坐标表示应变值，其中的四条曲线分别为不同恒定压应力作用下的徐变特性曲线。从图中可以看出，在不同的恒定压应力作用下，徐变特性曲线是不同的。当恒定压应力为 $\sigma_1 = 100$ 公斤/厘米²时，在 100 天以内，徐变速度逐变缓，100 天以后趋近于零。当恒定压应力为 $\sigma_2 = 150$ 公斤/厘米²时，徐变的初始阶段为变速徐变，而后则进入等速徐变状态，但 60 天以后又进入了徐变速度急骤增长的变速徐变状态。当恒定压应力为 $\sigma_3 = 205$ 公斤/厘米²时，初始阶段的变速徐变与等速徐变的时间较短，约在 20 天以后就进入了徐变速度急骤增长的变速徐变状态。当恒定压应力为 $\sigma_4 = 300$ 公斤/厘米²时，几乎看不到初始阶段的变速徐变阶段，而是一开始就以很高速度的等速徐变使应变急骤不断地增长。

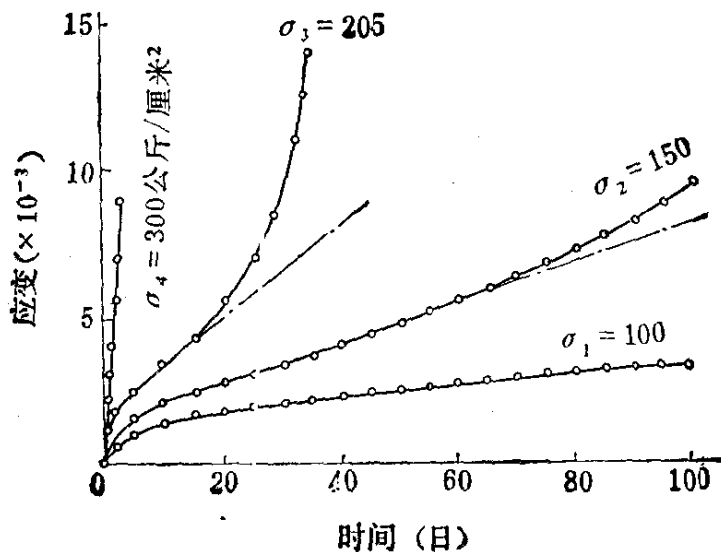


图 2.3 石膏徐变特性曲线

把这四种徐变特性曲线进行比较可以看出：
 恒定压力为 $\sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ 时，试件的应变都随时间的增加而增长，并且最后都以试件破坏而告终。