



JINGDAO YU KENGDAO

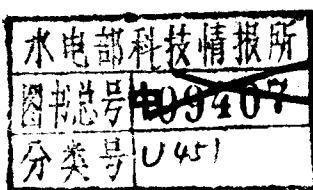
JINGLIXUE

隧道与坑道 静力学

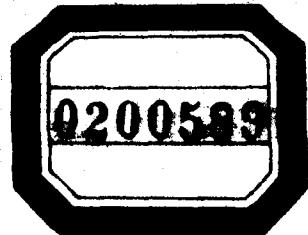
H·卡斯特奈 著

上海科学技术出版社

89



TV554



隧道与坑道静力学



H. 卡斯特奈 著

006150 水利部信息所

同济大学《隧道与坑道静力学》翻译组 译

上海科学技术出版社

2W57/13

内 容 简 介

本书是将岩石力学原理应用于隧道与坑道建筑工程的一部较为系统的著作。作者把围岩分为坚固岩层、破碎岩层、无粘结力松散地层和有粘结力松散地层四类,并且从弹塑性体观点出发,对隧道与坑道工程中的岩石力学问题,特别是关于围岩塑性区理论和围岩压力(地层压力)理论问题作了较系统的阐述,同时还举了不少实例。书中所述的某些观点目前已在世界各国有所引用。

本书还介绍了岩石力学在水力发电工程中的应用,对压力隧洞、压力竖井以及地下发电厂房的设计和计算作了深入的研究和探讨,对锚喷支护也作了扼要介绍。

本书可供从事土建、水利、国防、铁路、矿山等地下建筑的勘测、设计、施工和科研人员以及有关高等院校师生参考。

STATIK DES TUNNEL-UND STOLLENBAUES
auf der Grundlage geomechanischer Erkenntnisse
Hermann Kastner
Zweite neubearbeitete Auflage
Springer-Verlag, 1971

隧 道 与 坑 道 静 力 学

H. 卡斯特奈 著

同济大学《隧道与坑道静力学》翻译组 译

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

本书由上海发行所发行 上海市印刷四厂印刷

开本 850×1166 1/32 印张 9.375 字数 247,000

1980年2月第1版 1980年2月第1次印刷

印数 1—6,000

书号: 15119·2012 定价: 1.40 元

译者的话

近年来,世界各国在岩石力学及其应用方面发展极其迅速。为了促使我国在岩石力学和地下建筑工程方面早日赶超世界先进水平,我们翻译了H. 卡斯特奈(H. Kastner)著的《隧道与坑道静力学》一书(1971年第二版)。这是一部将岩石力学基本原理应用于隧道与坑道工程的较系统的代表性著作。本书的前半部分,对于隧道与坑道工程的岩石力学问题,特别是关于围岩的塑性区理论及围岩压力(地层压力)理论问题作了较系统的阐述,指出了侧向围岩压力乃是关键问题;同时还列举了不少实例。本书的后半部分则着重介绍了岩石力学在水力发电工程中的应用,对压力隧洞、压力竖井以及地下电站厂房的设计与计算作了较为详细的探讨,并扼要地介绍了锚喷支护。本书所述的某些观点和见解,已在世界各国有所引用,对我国水利电力部门及其他有关部门都有一定的参考价值。

本书的不足之处在于作者把岩体都视作为弹塑性体来看待。实际上,岩体大多是复杂多变的多裂隙体,岩体的力学作用与岩体内的裂隙发育状况紧密相关,特别是与其中的主要软弱结构面的性质和发育状况有关。岩体的变形和破坏都在不同程度上受结构面的约束和控制。所以,在更多的情况下,岩体是属于不连续介质——块裂体。但本书没有对这方面进行研究和讨论,致使其应用受到了限制。此外,本书成书时,作者尚未及引用断裂力学理论和有限单元法;同时书中所提出的某些观点和计算方法,随着围岩压力理论的发展也不无商榷之处。望读者有鉴别地予以参考和应用。

在翻译过程中,我们按照我国社会主义建设的实际需要为基础,对原书中的一些与主题内容无关的部分作了少量的删节;或为

了使内容连贯通顺,增加了个别语句。我们对变动较大的作了加注说明,一般的就不再另行指出。

本书在翻译过程中,中国人民解放军空军某部郑颖人、孔令辉两同志和我们一起进行了翻译和校对工作。本书第1~3章由汪兴传、程鸿鑫同志翻译,第4~8章由郑颖人、孔令辉同志翻译,第9~12章由潘昌乾、汪兴传、徐伯梁同志翻译。全书由郑颖人、程鸿鑫同志进行统校和定稿。另外,在译校过程中,承陕西省建筑科学研究所、西北农学院水利系、水利电力部成都勘测设计院、中国科学院地质研究所、云南省电力勘测设计院以及水利电力部情报所等单位的同志,分别对本书有关章节作了校对并提出宝贵的意见,谨在此表示衷心感谢。由于译者业务水平有限,缺点和错误在所难免,请读者给予批评指正。

同济大学《隧道与坑道静力学》翻译组

1978年12月

第一版序言

本书的任务在于研究隧道与坑道建筑以及所有地下洞室的静力学问题。在这一课题内,结构物与地层的共同作用,以及根据这种共同作用所求得的临时支护和永久支护上的荷载具有决定性的意义。因此,这种共同作用就成为决定支护形式和进行计算的基础。由于支护的形式和计算,从狭义上来说就是确定支护的布置和尺寸,它与所采用的建筑材料的强度性能有关,这是属于一般的工程力学的问题,因而本书未用专门的课题来加以阐述;而此类力学问题只是当隧道与坑道建筑本身所要求时,本书才予以讨论。但是,关于确定支护上的荷载问题,也即地层压力问题倒是更为困难的,因此本书把它作为研究的重点。

对于建立在松散地层内的结构物的地基,以往静力学的研究最终是选择地基的允许应力,但在最近十几年来出现了变化,人们认识到地基就其效能来说属于结构物的组成部分,并要求通过对基本原理的积极研究,使之发展成为土力学学科的一个重要分支。对于隧道与坑道建筑来说,与上述情况类似,甚至在更高的程度上,必须考虑地层的承载作用以及地层与结构物在静力学方面的相互关系。鉴于上述见解,首先需要地质学方面的知识,这在本书的阐述中已给予应有的重视。同时还注意到,既应当不断地吸收重要的地质概念和见解,也必须与本书的思路和意图相一致,还应当符合力学方面的考虑,这样才肯定不会失去阐述的正确性。还必须指出,本书对于地质学方面的那些往往不清楚的定义和表示方法,以及由此而涉及到的有关工程技术的边缘问题,也都作了适当的说明。为工程目的服务的这部分地质学必须服从工程力学的规律,同时又必须符合地质学的定义,于是就形成了岩石力学。

岩石力学是一个正在发展中的学科分支。事实表明,尽管它

从属于地球物理学的广泛领域,但它仍可以作为一门独立的学科。当然,在力学方面也会出现同样的现象,而且力学原先是物理学的一个组成部分,但是它随着工程实际的需要,并通过人们的实践而获得了发展,就它的重要性及其影响程度之深,对于局外人来说几乎是不能想象的。

在研究隧道与坑道静力学问题时,如果不能建立在自然的规律上,也就是岩石的力学特性的基础上,那么我们会立即遇到一个不可逾越的障碍。因此,本书的第一章是叙述岩石力学这个范围内一些最重要的知识。虽然在后两章即第二、第三章,是叙述地层的初始和二次应力状态,但就其本质来说,仍是属于基本原理方面的内容,并由此可预见到关于地下洞室的支护方面,特别是在地层压力方面的一些问题。隧道与坑道建筑的荷载问题,最广义地说也就是地层压力问题,它是地下建筑工程和矿山工程特别迫切希望解决的问题。但在这方面许多见解的分歧达到了令人惊奇的程度,因此在第四章中,对于地层压力问题的发展作了概略的叙述,其中应用了以往一些正确的知识,同时也写进了一些至今还有人赞同的错误看法,借以通过比较而使人们获得正确的认识。当然,正如在其他书刊中所惯见的那样,不可避免地会有一些批评性的意见,但这些意见只是为了讨论问题。

按照本书的目的,第五章是研究松散地层中的计算问题,第六章中研究出现真正地层压力时的计算问题。在这两章中,重点是研究支护上荷载的确定,理论上的探讨自然占有特别重要的地位,但对于数学公式则力求简单,尽可能使之清晰明了。由于过细的数学研究往往不能同隧道与坑道建筑的粗略条件相协调而被中止;而另一方面,理论知识的作用在于指导隧道与坑道建筑的实践,这一点总是适当的,也是值得推荐的。

本书的特殊章节即第七章和第八章,是关于压力隧洞和压力竖井的静力学问题,因为水力的利用,尤其是在高水头发电站中,输水管道是极其重要的构筑物。研究在压力隧洞和压力竖井中所出现的静力学问题,对于这些工程具有相当的经济价值,因此应给

予必要的重视;同时,还要特别注意理论知识与实际效果的相互关系。关于岩石中的大型洞室和地下厂房的静力学方面的判断,也有与上述相类似的情况,这在本书第九章中作了简短的叙述。

最后,本书讨论了关于隧道与坑道建筑新方法的静力作用,同时对施工方法也作了简短而完全必要的说明。

如果要推荐这本书的话,我希望本书所研究的课题有助于在隧道与坑道建筑的理论问题上得到详细的概念,并促使其进一步发展。在隧道与坑道建筑中所获得的经验,它的重要性并不会由于理论问题的探讨而有所降低,反而会更加重视。

Н. 卡斯特奈

1961年10月于因斯布鲁克

第二版序言

1962年出版的本书第一版已被专业界好意采纳。在国内外杂志上的讨论是一致赞同的,并未对此提出修正的建议。

本版尽管在章节次序上作了少许变动,但在材料的划分原则上并无更改,而在数学公式的推导方面,为有利于学习,已使之更为详细明了。

另外,对于相当坚固岩石情况下的隧道掘进机的应用方面,本书的内容有了进一步的扩充。本版还叙述了萨特勒 (K. Sattler) 进行的地层压力问题的大型试验。

岩石力学问题在本版中通过简短的提示更加得到了重视,特别是侧压力问题,这是岩石力学中的关键问题,甚至已成为一个主要的原则问题。

И. 卡斯特奈

1970年夏于因斯布鲁克

目 录

译者的话

第一版序言

第二版序言

第一章 岩体的力学性质	1
1. 关于基本原理	1
2. 作为地下建筑重要组成部分的岩体	2
3. 在高压应力条件下固体的特性	6
4. 弹性和塑性	8
5. 由塑性流动和破坏引起的地层破裂	10
6. 空间应力状态的平面图示	14
7. 岩石破坏的莫尔理论	18
第二章 岩石的分类	20
8. 地球物理的观点	20
9. 工程技术的观点	21
10. 固结岩石的分类	22
11. 松散岩石的分类	23
第三章 地层的初始应力状态	24
12. 由覆盖层引起的应力	24
13. 移动压力	36
14. 无粘结力松散地层中的初始应力状态	36
15. 粘性松散地层中的初始应力状态	39
第四章 地层的二次应力状态	41
16. 研究工作的特点	41
17. 厚壁管的弹性理论	42
18. 岩层中的二次应力状态	46
19. 侧压力系数较大时的塑性区	49
20. 各个方向初始压力相等时形成的塑性区的一些例子	54

21. 初始垂直压力占主要时的塑性区边界	56
22. 地层处于初始潜塑状态时的二次应力状态	61
23. 松散地层中的应力	62
23a. 可移动的水平带条应力传递现象的理论研究	63
24. 在隧道或坑道中粘性松散地层的膨胀	68
第 五 章 隧道和坑道结构上的地层压力	71
25. 地层压力的概念	71
26. 松动压力	72
27. 真正地层压力	75
28. 岩爆	76
29. 来自侧面的不大的地层压力	80
30. 来自侧面的强烈的真正地层压力	83
31. 来自各向的强烈作用的真正地层压力	84
32. 用塑性理论说明真正地层压力	85
第 六 章 无粘结力松散地层的计算	89
33. 应力传递和穹顶作用	89
34. 浅埋时永久支护结构的计算	91
35. 靠近地表面的傍山隧道上的荷载	93
36. 浅埋时易挠曲支护结构上的应力传递	95
37. 破碎地层中的松动压力	96
38. 深埋时永久支护结构上的地层压力	100
39. 关于无粘结力松散地层中隧道和坑道上荷载的基本理论	106
第 七 章 真正地层压力的计算	108
40. 一般观点	108
41. 支护结构的造型	110
42. 处于初始弹性状态和有较大侧压力系数的隧道和坑道的 计算	115
43. 深埋隧道的建筑限度	122
44. 岩层处于初始弹性状态和侧压力系数较小情况下的计算	125
45. 岩层处于初始塑性状态下洞室衬砌的计算	128
46. 膨胀压力	130
47. 顶部地层压力的经验数据	134

第八章 压力隧洞	139
48. 高水头电站引水管路概述	139
49. 压力隧洞的断面形状和衬砌种类	140
50. 关于单层混凝土衬砌压力隧洞的理论	145
51. 具有配筋内层的压力隧洞	151
52. 压力隧洞建筑中的预应力混凝土	154
53. 依靠岩层支撑作用施加预应力方法的静力研究	160
54. 影响预应力损失的因素	165
55. 迅速施加预应力时预应力的损失	168
56. 较迟施加预应力时预应力的损失	174
57. 预应力压力隧洞的量测	175
58. 灌浆	178
59. 压力隧洞的破坏事故	180
第九章 压力竖井	186
60. 压力竖井概述	186
61. 卸荷系数	187
62. 卸荷系数的计算	190
63. 卸荷系数关系式的讨论	195
64. 电站使用过程中卸荷作用的下降	198
65. 电站使用后与时间有关的使卸荷作用下降的影响因素	201
66. 压力竖井的计算	207
67. 关于确定卸荷系数的基本原则	212
68. 压力竖井衬砌层应力的附加作用	214
69. 压力竖井和压力隧洞钢衬的鼓突现象	220
70. 压力竖井的破坏事例	225
71. 关于压力竖井施工的基本原则	232
72. 用预先捣实法浇筑混凝土衬垫	233
第十章 洞室	237
73. 一般评论	237
74. 顶拱的静力研究	240
75. 关于侧壁稳定性的判断	246
76. 小结	250

第十一章 新的施工方法	252
77. 岩石锚杆的种类	252
78. 岩石锚杆的应用范围	255
79. 喷混凝土施工方法的特点和发展	259
80. 喷混凝土的工艺	262
81. 用来防御局部松动压力的薄层喷混凝土衬砌	264
82. 在岩层非常破碎或出现轻微的真正地层压力时,采用中等厚度的喷混凝土支护	266
83. 在出现强烈的地层压力时,采用钢拱架和较厚喷混凝土的联合支护	270
84. 喷混凝土临时支护的可能应用范围	273
85. 全机械化的隧洞开挖	275
第十二章 结束语	280
参考文献	282

第一章 岩体的力学性质

1. 关于基本原理

本书是以隧道和坑道静力学作为研究的主题，并以岩石力学的基本原理为研究的出发点。因而，在这里，岩石力学的基本原理是十分重要的，一般力学问题则必须围绕这个目的与其配合研究。本书主要叙述力学方面的知识，但也引用了一些地质学方面的知识，作为本书进行研究的一种辅助手段。此外，在本书中，不单是引用了一些研究的成果，而且还示出了它的全部推演过程。

由本书书名表明，这里基本上是讨论理论性的问题，尽管如此，本书也对一些实际问题有目的地作了阐明。在处理隧道和坑道建筑问题方面，甚至在矿山建筑中，多年来解决问题并不着重于理论上的探讨，而是把实际经验放在优先的地位。但其先决条件应当是在相同的给定条件下，同类型的建筑物已经实施，这样所取得的一些经验才具有价值。然而，由于目前所修建的隧道和坑道建筑的地质条件变化很大，因而从已竣工的建筑物中所取得的经验一般来说不具有什么价值。鉴于这种情况，理论是具有决定性价值的。从这一观点出发，可以认为理论具有决定性的实际意义。

工程技术问题的理论研究，没有数学是不可想象的。本书中一般不限于得到计算结果，而是要导出所谓的“公式”，这里也许用“关系式”这个名词要比用“公式”的名词更确切些。但是，由什么样的前提来求得“关系式”是有决定性意义的，因而搞清楚基本原理尤为重要。然而，自然界的变化常常是如此复杂，以致没有简化的假设就无法研究问题。但是，由于简化而引起的副作用可能使有决定性意义的变化过程和规律性看不清楚，因此，重要的是搞清楚以关系式所表述的事态。就这个意义来说，希望读者要了解一

些理论研究方面的文献资料。

此外,本书可用以充实隧道和坑道建筑方面的理论,尤其是地层压力理论,以及丰富地质学和地球物理学方面的研究,并有助于从本质上弄清这些问题。这里,特别是还对褶皱地层形成的一些尚未解决的问题提供了线索。

2. 作为地下建筑重要组成部分的岩体

岩体作为地下建筑的重要组成部分,它的强度性能起着重要作用,所以,对于岩体强度性能,例如抗拉强度、抗压强度、剪切强度,还有弹性和塑性都有必要进行详细阐述。这些强度性能最终都可归结到与电磁特性有重大关系的原子结合力。结合力的根本问题在于物质质点* (Elementarteilchen)之间存在着取决于质点间距的吸引力和排斥力,并由它决定了物质的强度性能。这种吸引力和排斥力的共同作用可由下面的图例(图1)来表示。如果图1的内力变化曲线适用于物质质点,那么,基本上也适用于固体晶粒,毫无例外,也必然适用于主要是结晶岩石的质点。

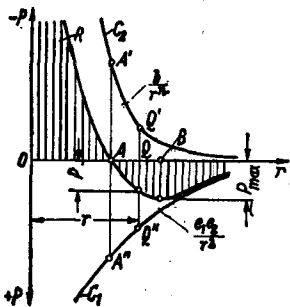


图1 以质点间距引起的内力变化说明物体的抗拉性能、抗压性能和弹性

在固体中,处于相对静止状态的物质质点围绕其自身位置四周产生振动,其动能仅与绝对温度有关并成比例关系。由于物质质点存在着扩散的可能性,因此在固体内部的质点并非填满整个空间,而是以一定的平均间距维持在一定的位置上,此时质点之间的吸引力和排斥力正好处于平衡状态。如果组成结晶岩石的质点是离子,则离子间的吸引力遵守库仑定律,

如果组成结晶岩石的质点是离子,则离子间的吸引力遵守库仑定律,

* 物质质点是指组成物质的基本组成部分,包括分子、原子、离子及离子团等。由于原书本节及图1说明中引用术语较紊乱,译者作了适当统一和修改,以利阅读。——译者注

它的表达式为 $e_1 e_2 r^{-2}$ ，而排斥力则随着间距的较高次方 br^{-n} ($n > 2$) 而减少。只是在这种情况下，才有可能使得当质点间距缩小时，质点排斥力的增长大于吸引力的增长。

从图 1 可以看到，随着质点间距的增长，由曲线 C_1 所表示的吸引力要比由曲线 C_2 所表示的排斥力的减小要小得多，由两者迭加所得到的结果为合力 R ； A 点的排斥力和吸引力相等，同时外界应力为零。由曲线 R 可见，物体的抗压性能只存在于 OA 区内，而当物质质点间距超出了 A 点所示的平衡状态时，物体就显示出抗拉性能。如果物质质点间距还超过了 B 点，则平衡状态就不能存在，超出了内聚力而产生分离破坏。

在平衡位置 A 点周围，物质质点进行不均衡的热运动，这是由于产生较小的 $-\Delta r^*$ 的能量又会导致产生较大的 $+\Delta r$ 。随着温度的增长， $+\Delta r$ 值相对于 $-\Delta r$ 值来说总是要大得多，随之产生了以分子运动形式表现出来的热膨胀。

结合力的解释是物理化学方面一个相当复杂的问题，由图 1 所反映的随着质点间距变化而引起的吸引力和排斥力的变化，是具有一定说服力的。但如已经提到过的那样，对于岩体来说，这种结合力决不会在整体范围内都出现，主要是通过岩石的构造裂隙来体现的，更弱的部位甚至结合力消失了。因此，对应用于工程的目的来说，岩石的结合力需要有极大的余量，以便于具有必要的储备。由于岩石的结合力至今尚不清楚，因此，现在举铁的例子来说明，铁分子内压力约为 320000 kg/cm^2 ，而铁的抗拉强度（各向拉力相等）仅为该数值的很小一部分。即使是水也具有很大的分子内压力，在 0°C 和标准大气压时，威尔斯 (Wals) 计算为 11000 kg/cm^2 ；而水的抗拉强度却是很小的，但它确实是存在的，例如毛细管现象和机器制造中很不希望出现的气孔现象。后者，按其本质来说，是在液体中产生了分离破坏（拉裂）的结果。

大多数固体是结晶状的，即由晶体所组成，这也无例外地适合

* Δr ——物质质点在平衡位置 A 点，由于不均衡的热运动而引起间距 r 变化的增量。间距增大时， Δr 为正；反之， Δr 为负。——译者注

于地壳的岩石情况,因为非晶体的岩石,即玻璃状凝固的岩石是不常见的。晶体具有各向异性的强度性能。如果物体由晶体所组成,那么从统计角度来看,它不是存在着均匀分布的强度较小的面,就是存在着一组有规则的裂隙。在前一种情况下,虽然假定晶体状的物体为各向同性,但事实上其强度性能仍取决于晶体间的较小结合力;并由于物体含有杂质和细孔以及晶粒界面上有微弱裂隙带,因此也还存在着软弱部位。对于那些组合起来的岩石,如砂岩和砾岩那样的沉积岩,也存在着同样的情况。然而可以设想,对于完整的岩石试件,如果预先只是发现有均匀分布的结构缺陷而不存在规则裂隙的话,这种情况的大量组合的岩体,则可作为均质和各向同性体来考虑。不过,在地壳表层的岩层中,几乎绝对不可能是均质和各向同性体。有规则的裂隙,此外孔洞、裂口和缝隙以及含有某些低质岩石等影响,岩体的强度性能就会显著降低,因此促使我们注意到,评价岩体强度除了应考虑岩块强度以外,还必须考虑由于裂隙而引起的削弱现象。由此可见,在具有规则裂隙情况下,尤其是对层状或片状岩石,进行各个不同方向荷载下的强度试验,对于了解其性能具有极其重要的意义。

试件越大,试验时出现破坏的情况就越多,而且概率也越大,这样就可以成功地得到岩体的强度性能,如单轴抗拉强度、抗压强度和剪切强度,以及弹性和塑性的正确结果。如果在隧道和坑道建筑中出现了真正的地层压力,又提供了良好的试验数据,那么就可以对岩体强度性能作出更确切的判断。

下面的一些例子可作为上述观点的例证。在建造辛普伦(Simplon)隧道时获知,当覆盖层厚度为1600m时,总共有9km的长度上出现了真正的地层压力现象,这种现象总是表现为在隧道穿越的地方岩体产生坍方。类似的情况在建造列奇堡(Lötschberg)隧道时也存在。那里也出现真正的地层压力现象,覆盖层厚度为1600m或更大一些。再举一个例子来说明,在史瓦尔察(Schwarzach)的萨尔查赫(Salzaach)电站的兰特(Lend)工地的千枚岩中,当覆盖层厚度为400m时,在坑道两侧产生有规则的