

岩石力学译文集

中国科学院
水利电力部 水利水电科学研究院译

中国工业出版社

岩石力学译文集

中国科学院
水利电力部 水利水电科学研究院译



中国工业出版社

本书共选譯了国外有关岩石力学方面的論文八篇。內容偏重于岩石力学在工程(特别是水利水电工程)上的应用,其中包括:岩石力学与水电工程、岩石力学与坝工設計,第七次大坝會議关于岩石力学問題的討論,以及其他关于山岩压力試驗研究方面的成果等。

本书可供水利水电設計人員、工程地质人員和科研人員使用,亦可供其他工程技术人員和高等院校的有关师生参考。

岩石力学譯文集

中国科学院
水利电力部 水利水电科学研究院譯

*

水利电力部办公厅图书編輯部編輯(北京阜外月坛南营房)

中国工业出版社出版(北京佟麟阁路西10号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第110号

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ ·印张 $8\frac{1}{2}$ ·字数202,000

1966年2月北京第一版·1966年2月北京第一次印刷

印数0001—2,190·定价(科五)1.20元

*

統一书号: 15165·4270(水电-585)

前 言

岩石力学是一門新兴的学科，它在本世紀50年代末才正式形成和开始引起工程界的注意。随着我国社会主义建設事业的蓬勃发展，岩石力学的研究在国内受到了应有的重視。因为在工程实践中，不論是水利水电建設中的大坝地基、地下厂房和隧洞工程，或是矿山、鉄道、建筑工程等方面的許多問題，莫不需要用岩石力学的观点进行分析研究。但是，由于岩石本身的复杂性，岩石力学在国内外迄今尚未形成一套完整的理論。

在国外，1957年巴黎出版的塔洛布尔(J. Talobre)的专著“岩石力学”，是这方面一本較系統的著作。其后，有关刊物又发表了許多論文，并开始形成了不同的学派（如法国学派、奥地利学派等）。1961年夏在羅馬召开的第七次国际大坝會議，把岩石力学問題列为四个討論专题之一。1962年在奥地利的薩尔茨堡正式成立了“国际岩石力学学会”。

目前这門新兴的学科发展得极为迅速，新的研究論文和試驗成果陸續涌現。为了配合我国水利水电建設和科学研究的需要，我們編譯了这本文集。內容的編选和譯文本身均可能有不恰当的地方，希望讀者多加指正。如有意見，請寄：北京西郊景王坟水利水电科学研究院技术处。

水利水电科学研究院

1964年9月

目 录

前 言

岩石力学与水电工程.....Ch.叶格尔(1)

岩石力学与坝工设计.....Ch.叶格尔(55)

岩石力学的一种研究途径.....K.W.约翰(77)

岩石力学和1961年罗马第七次大坝

会议.....S.李立阿夫斯基(111)

法国十年来岩体内部压力观测工作的进展及其

实用结果.....J.塔洛布尔(184)

矿山压力问题的讨论总结.....苏联《煤》杂志编辑部(210)

矿山压力研究方法概述.....III.M.比利克(219)

在研究岩体深部应力时采用应力解除法的

经验.....M.A.斯洛鲍多夫(255)

岩石力学与水电工程

Ch. 叶格尔

虽然在水电工程中，已在岩石内开凿了成千的隧道，在岩石上建筑了成千的混凝土坝，并且失事非常之少，但是如果失事，就会有如同坎德斯特格 (Kandersteg) 隧道失事那样的损害^[9]。这是一条很早建成的水电站的供水隧道，原来设计为无压隧道，但后来却成为有压隧道，承受中等程度的水压力。在良好的混凝土衬砌部分曾经有三次发生裂缝，与隧道轴线平行。此衬砌部分，修理过两次。但第三次渗流的水，穿过衬砌的裂缝，引起山崩，致有数人死亡，并且财产损失也很大。

这次山崩的原因是水锤作用，引起隧道的高谐波发生共振(这是第十一谐波)^[9,21]。在谐波压力波腹之一处的附近有软弱的岩石，这就说明了为什么在同一地点的衬砌部分，虽经修补仍然发生三次破坏。该处衬砌部分，发生长 30 米、宽 3 厘米的裂缝三条，水从裂缝中渗出，流过透水岩层最后聚集在不透水岩层的顶部(图 1)。在山坡底部流出一股泉水，山坡变为不稳定而滑

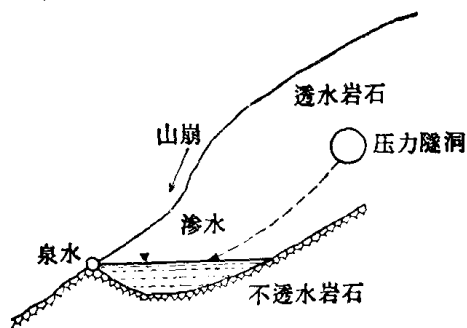


图 1

动。这次失事，是衬砌部分发生很高的应力而地质条件又不好两事不幸巧合所引起的。这是一个典型的例子，可以说明许多类似失事的原因。

别处类似的情况，文献中亦曾提及。有时破坏的原因是衬砌不好，但是由于岩石条件不好的原因更多一些。

近来发生的坝工事故，不必在此多說。对于法国馬耳帕塞 (Malpasset) 輕型拱坝的失事惨祸，水电工作人员无不记忆犹新。我们从工程杂志中最近发表的初步报告中，得悉此坝在基础之下某一深度处的岩盘遭到了破坏。

許多工程设计是正确的，但也有少数例外是失败的。必须研究一些方法，来及时地找出这些少数例外的弱点。本文旨在引起对岩石力学更系統的研究工作。深望通过討論及爭辯，不断获得更进步和更安全的設計方法^①。

在最近的将来，工程师們将面临一些更困难的問題。欧洲阿尔卑斯山区中和世界上其他許多地方最好的坝址早已被利用了，余剩的坝址亦比較不如前者安全。技术的发展方向，面临着在劣质岩石上面或内部施工的新問題。

(一) 岩石力学的最近发展

土力学已有长远的记录，但岩石力学不同^[5]，从土木工程方面来看，历史是很短的^②。法国塔洛布尔 (Talobre) 的有名課本，是岩石力学的第一本內容丰富的书，1957年才出版^③。工程师对于岩石力学作专门的研究，是从施腊夫尔 (A. Schrafl)^[8] 报告提出关于里通 (Riton) 隧道的失事情况 (1920年) 开始的。

-
- 国际大坝會議最近已設立地下工程的临时分委会，这个組織在一些国家中各設有本国的委员会研究这一問題。美国科罗拉多州矿业学院和米苏里大学，已經出版两种“岩石力学論文集”，总结有价值的研究工作。最近在比利时以及德意志民主共和国 (萊比錫) 亦在这方面用力研究。
 - 在这方面先做工作的人，有施米德 (T. Schmid) (瑞士苏黎世) 和芬納 (R. Fenner) (智利)。参看参考文献 [4, 7]。
 - 参看参考文献 [24]，并参看参考文献 [5, 7, 17]。

那时才首次証明：岩石是一种弹性介质。过了数年后，有几个作者在計算隧道的混凝土衬砌和鋼板衬砌时采用了这一概念。这一理論后来在許多課本中轉載了^[5]。对于采用岩石作为能承受应力与荷重的材料，其性能如何，早先有几种解释，这一理論是其中之一。

当瑞土地质学家海姆（A. Heim）所作关于岩石預应力的理論为現代学者所接受之时，岩石力学前进了一大步。这位通晓阿尔卑斯山地质情况的专家的理論的重要性，經過多年才为工程师們所正确理解^[1]。从那时以后，关于隧道周围岩石应力的正确理論才建立起来。更重要的是，只有利用海姆的岩石預应力假說，才能正确地解释隧道中所得的应变-应力图。另一現代学派包括斯体尼（Stini）、米勒（Müller）等地质学者，以及奥貝尔提（Oberti）、托尔（Torre）和塔洛布尔等工程师，他們发表的論文，集中在奥地利杂志“地质与建筑工程（Geologie und Bauwesen）”上。

岩石力学的特点，是所有問題互相关連。如果不了解岩石中三个主要方向的預应力，就不能决定岩石的强度，因为岩石强度是随着岩石預应力而定的。这一点亦同样适用于岩石裂縫和岩石孔隙中的水压力，而岩石內灌浆問題与岩石排水問題也是密切相关的。最后，关于坝基的各种理論也不可能孤立地发展，而我們所得关于岩石性能的知識，多是从开挖隧道的經驗中所体会到的。这就是为什么关于坝基的岩石力学，必須与开挖隧道的經驗平行发展。在同一类技术的两大部門之間，是不能截然分开的。

塔洛布尔在所著“岩石力学”的第一章中，即指出土力学与岩石力学不同之点。他強調了要建立一門岩石科学，完全不依附土力学。同时，土力学也有了新发展^[20, 28]。塑性的概念已引入現代土力学中，对于土中水分所引起的孔隙压力的分析也前进了一步。另一方面，混凝土坝中的孔隙压力，也已經彻底分析了。岩石力学已經逐漸建立了本門的一套研究方法，并且充分利用了其他科学領域中的进展。岩石力学必須和其他許多方面的进展保

持密切联系。

(二) 岩石力学在水电工程中的直接目的

假如为岩石力学的进一步研究工作作一草案，则可初步提出以下意见。

岩石是一种各向异性的材料。它的各向异性是很特殊的类型，因为它不只是由于其物理常数(弹性、凝聚力、压碎强度等)随不同方向而各异，并且其物理常数有突然变化，往往在有限的范围内即如此；此外，还发生裂缝，张开的裂隙以及充填粘土的裂隙，其方向常有变化而并无规律。岩石的这种基本非均匀性，不是微观的，而是大范围宏观的，这就是岩石力学进展迟缓的原因之一。乍一看来，似乎任何数学分析都难于应付这些情况。

让我们举例加以说明。假设在一种均质的各向同性的介质中，开挖圆形的压力隧道，其内压力为 p ，则所引起的問題，可根据轴对称法用数学分析求解(图2a)。但假设在一各向异性的岩石(图2b)中开挖同样的圆隧道，该种岩石具有不同的弹性模数 E 和 E_1 ，那末至少在目前还不能用数学分析的方法表明其应力和应变的分布情况。但是在另一方面，我们也不应放弃对于某些极为简化的情况(各向同性介质)的理论分析方法。放弃这种分

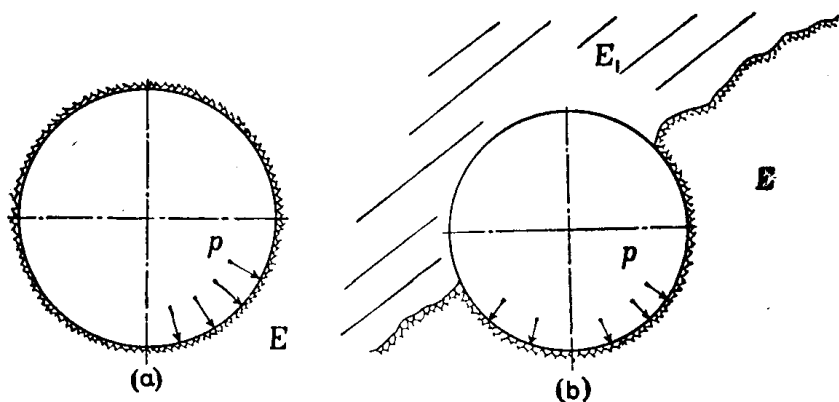


图 2

析方法是不利的，岩石力学就会停滞不前。当对于假定的各向同性介质的各种条件进行数学分析而发生困难时，例如在三向问题中，则可借助于最近所用的三向光弹性分析法，以求出应变和应力分布的正确情况。但也应努力从一些选择的试验中，了解岩石中天然的应力和应变与理想解法有何不同。

必须将对于岩石弹性、凝聚力、内摩擦力等的基本假定加以改变，以求得其它数学处理方法。把用各种方法求出的岩石性质加以比较后，对于岩石物理性质就可以得到一些认识。数学方法为进一步的研究提供了基础。换言之，在研究时必须用一部分力量，根据各向同性的假定，寻求问题的数学解法。在现场试验岩石，就能求出岩石的几项重要物理性质的数值，把试验结果和理论相比较后，就有可能评定某一设计的安全程度。

有几种岩石性质在变化广泛的条件之下，仍然极为稳定。下列情况是众所周知的，并且曾经为多次试验证明[●]，即：令一块岩石承受三轴荷重，并且荷重很大，引起严重的塑性变形，虽然经过剪切，并且可能发生结晶体的重新分布，但该岩石的弹性模数实际上保持不变。应力应变曲线，在显出很分明的不连续性或表示岩石的塑性屈伏后，仍恢复其平滑曲线的形状，而具有某种稳定的角梯度[●]。

看来，把裂缝岩石作为大块体研究，可以在说明时使用某些“平均的”特征常数（例如岩石凝聚力、岩石内摩擦力等），正如说明无裂缝岩石块体一样。但这些常数的数值显然是低得多。许多已公布的试验结果，指出这一方法是可以接受的。所以看来在将各向异性裂缝岩石作为大块体来研究时，也可借助于从现场试验所得到的岩石常数的正确数值，并假设岩石具有某种程度的各向同性，从而应用简化的数学处理方法。必须经常注意把理论

● 最近在瑞士艾肯(Eichen)的试验性隧道中进行了大规模试验，所用压力达到200公斤/平方厘米，证明了这一事实。法国塔洛布尔在最近向第七次国际大坝会议提出的报告，其结论与此相同^[40]。

● 大多数的应力-应变曲线表明了岩石的塑性变形。对于达到塑性屈伏点一次或两次的弹性变形，必须更加注意(参看图6b)。

結果与实际測量相比較。

主要的努力应当是作出标准試驗方法，以求得岩石常数的可靠数值。

可以举例說明这种研究方法。对于圓隧道，我們可以假定岩石是坚实整体的，或是具有徑向裂縫的，或是塑性的，从而建立隧道周围岩石稳定性的理論。因为对于岩石物理性质所作的假定不同，所得分析結果也大有不同。所以在設計隧道时，应当能够根据这一观点把岩石进行分类，这是很关重要的。其分类如下：

- 坚硬，大块体岩石；
- 裂縫岩石（裂縫成为徑向的）；
- 塑性岩石。

坚硬或大块体岩石而沒有裂縫的，或只有少数裂縫的，其包线可以成为抛物线形，与混凝土的曲线相似（图 3）。描繪有裂縫岩石（或塑性岩石）的曲线則困难得多。随着裂縫的类型及裂縫与各主应力的相关方向的不同，这类岩石可能只有很小的凝聚力，或全无凝聚力。如果裂縫中为滑潤的粘土所充滿，則摩擦系数将降低。在有压隧道的情况下，裂縫将沿圓径方向而发展。

上述这种分类还有更为重要之点，因为坚硬的岩石随着各种

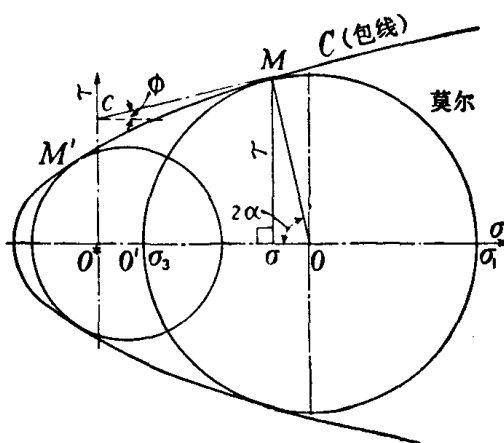


图 3

荷載及應力的情況，可以變成有裂縫的，或再變為塑性的（即如所謂岩石的摩爾包線所示的），這將在後文敘述（圖3和圖6）。但在另一方面，應力應變曲線能確切地表明岩石在巨大荷載下逐漸惡化變質的情況，並且能確切表示這種惡化變質將侵入岩石內到何種深度。

在現場試驗岩石的時候，了解岩石中應力和應變所達到的深度，以及了解岩石塊體的哪些部分實際受到試驗等情況，極為重要。我們將會看到對於各種試驗起反應的岩石體積，系隨着試驗的類型、荷載、施加荷載的面積、岩石的彈性模數，以及岩石預應力情況等而變化。對於上述各點，必須加以分析。當用數學分析方法不能清晰說明在試驗中由於試驗所引起的應力及應變情況時，則使用三軸的光彈性測量方法是有助的。

在現場所作的岩石壓碎強度試驗，所得的強度數字不是明確的，這是不能與試驗室中對混凝土試件所作壓碎強度試驗所得的數字相比擬的。為了說明現場的岩石，應同時把下列的資料加以比較並分析：

岩石的摩爾包線（如果可以作成這一曲線）；

岩石的彈性模數及其塑性；

岩石的預應力。

必須根據工程設計的性質（壓力隧道或壩基）以及施加於該處岩石的荷載的重要程度，採取不同的試驗岩石方法。對於試驗中的各種細節必須更加注意。

岩石分析最困難的問題之一，是必須最少在兩個特征的方向上決定岩石的預應力。在某處，對於因開挖岩石和對岩石施加荷載而引起的局部應力，都必須和由於岩石預應力所引起的各種應力相加起來。最後所得的各種岩石應力，將隨着先前已存在的岩石預應力而定，這一點是十分明顯的。此外，這項岩石預應力，對於岩石的強度很有關係，因為岩石強度隨着代表所有應力的各個摩爾圓與一條固定曲線（稱為岩石摩爾包線）的相對部位而定（圖3和6）。最後，岩石預應力對於岩石的彈性也很有關

系。受到强大預应力的岩石，将保持弹性，但如果将預应力除去，則此岩石将变为有裂縫的或塑性的（图6，引自塔洛布尔的著作）。

必須作出各种試驗方法，来更清楚地表示各向異性岩石預应力对于各向異性岩石强度的影响。将局部的岩石变形与全部的岩石屈伏相比較，就可对于岩石的各向同性和均匀性添加一条判別准則。当使压力隧道的一段受到靜水压力試驗时，則一次体积試驗可以表明岩石全部屈伏量与压力大小之間的关系，以及岩石的平均弹性模数和岩石塑性等。但必須用統計方法来分析局部应变測量結果，以了解局部应变和屈伏量与平均值相比較时的分散情况。

对于大量的資料进行統計分析，是岩石力学研究中的重要工作方法。

岩石也应该根据其吸收压力灌浆的能力加以分类。具有中等程度裂縫的岩石，經過灌浆处理能以变为相当坚实的岩块（至少在隧道的周围，开挖的坑洞的附近，以及坝台的附近是如此）。岩石的弹性模数可以由此得到稳定或增加，而塑性可以降低。但在另一方面，粘土类型岩石的灌浆是困难的，或者完全不能吸收浆液，灌浆对于其弹性模数不起作用。当岩石毫不吸收浆液，或吸收极少时，那么它就是具有极少裂縫的坚硬岩石块体，或者相反地是粘土类型岩石，而必須作为塑性体加以处理。对于这类岩石，灌浆甚至是有害的。

筑坝所用的混凝土，可以对其多年的物理的和化学的稳定性进行試驗，并且在各种不同的湿度和溫度下进行試驗。但是岩石經過多年可能不及混凝土的那样稳定。有某些类型岩石，在潮湿隧道中很快地恶化变质。在經過爆破后只有几个星期，岩石的强度就降低了；岩石表面在刚刚爆破后，可能立即硬化，但在几个星期以后，甚至可用皮鞋擦伤它。隧道工程师的經驗应当传授給坝的设计人員。某些类型的岩石，不能經受水或潮湿空气的作用，因此，是否适宜于作为大坝的基础，是有疑問的。一处岩

石, 对于某一新建的坝, 可以作为坚固的坝基; 但过了几年以后, 其孔隙中的水压力可能改变岩石的凝聚力, 使其较在坝刚建成时为低。岩石的主要物理性质随时间而改变的可能性, 是必须研究的。

最后, 还必须分析岩石的透水性。必须了解渗流水是否穿过孤立的岩石裂缝而引起危险的扬压力, 或者是否穿过很多的小裂缝, 而引起类似于坝中孔隙压力的应力分布状态。

这里建议, 在许多情况下, 具有很多薄缝的裂缝岩石, 或粘土类岩石, 用土力学中所用的方法作稳定性分析的計算, 可以得到初步近似值。岩石力学在水电工程中的直接研究目的是多方面的,

1. 进一步分析在隧道周围和坝基下的岩石的稳定性。
2. 发展各种試驗技术, 以求出在稳定性分析中所用的几种主要物理常数的数值。
3. 发展各种替换的試驗技术, 以便对大体积岩石作現場試驗, 并可比較各种試驗的結果。

(三) 岩石力学及岩石試驗技术的基本方面^[12,24]

大体积或坚固岩石的破坏的力学性质, 能用图 3 很好地表示出来, 图中有与各种破坏情况相对应的所有摩尔圆。可以看出有一条曲线 C , 是所有这些摩尔圆的包线。在任何时间, 当摩尔圆与曲线 C 相接触时, 即将发生岩石的破坏或岩石结构的重新排列。没有一个摩尔圆能切割曲线 C (代表純剪应力的一些圆, 是可能的例外)。

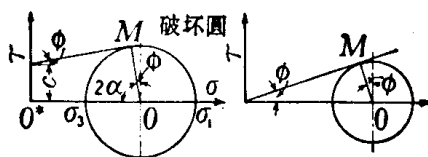


图 4

岩石破坏的另一种情况，也可由土力学原理的启发用图 4 来表示。

按照库伦 (Coulomb) 理论，如果

$$\tau < c + \sigma \tan \phi,$$

则岩石得到稳定。在上式中， c = 岩石凝聚力， $\tan \phi = f$ = 岩石的内摩擦力。沿着岩石的裂缝 $c=0$ ，此时只须考虑摩擦力(图 4a)。

当有孔隙压力或扬压力 u 在岩石孔隙内或裂缝中起作用时，则，

$$\tau < c + (\sigma - u) \tan \phi.$$

当岩石在塑性屈伏条件下发生破坏时，可用图 5 来表示，破坏是由屈伏判别准则决定，即在下列条件下立刻发生：

$$\sigma_1 - \sigma_3 \geq Y,$$

式中 Y ——对于该材料的常数^①。

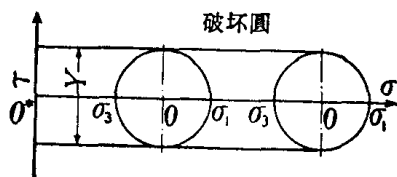


图 5

在这种情况下，假定内摩擦力可以略而不计。屈伏判别准则已被广泛地采用，用以确立金属的塑性变形（即晶体的重新排列）的理论，这是因为它与那包含内摩擦力的理论比较起来，可以采用较简单的数学方法。但是对于岩石条件而言，其内摩擦力

● 参看参考文献[12]第19页。 $\sigma_1 - \sigma_3 = Y$ 的这一条件，也称为特雷斯卡屈伏判别准则(Tresca Yield Criterion)，见Comptes Rendus Acad. Sciences, Paris, 59, 1864, p.754。

Von Mises, "Göttinger Nachrichten, math-physik Klasse (1913)"第582页写成 $(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 6K^2$ 。

大多数的实际问题要用较简单的特雷斯卡判别准则加以处理的。

是高的，而忽略內摩擦力不計，則所得的結果將是不能令人滿意的。現場的地质勘測及現場岩石試驗，將表明當地岩石是否可以按照上述各種類別分類，並且在何種程度上可以作上述分類。

在壓力隧道內用油壓千斤頂進行大體積或堅硬岩石的試驗，已經塔洛布爾^[24]、奧貝爾提^[29]及其他學者^①等說過。從塔洛布爾所著的書中選取的圖6表明，任何一個不與包線C接觸的摩爾圓，都相當於岩石穩定的情況。在應力應變圖上(圖6b)曲線的1—2, 4—5—6, 或7—8各段，相當於當摩爾圓不與包線接觸時(圖6a)的純彈性應變。在點2處，摩爾圓開始接觸包線C，即曲線的2—3相當於岩石的塑性變形以及岩石中結晶體的重新排列，同一應力應變曲線中的3—4段和6—7段也是如此(圖6b)。例如，在圖6a中，可以看到圓周6和圓周7正接觸着包線C。從6至7，各圓周都和C線相切，岩石發生塑性變形。假如岩石突然卸去荷載，如點7至點8所示，則變形將再變為彈性的。在應力應變曲

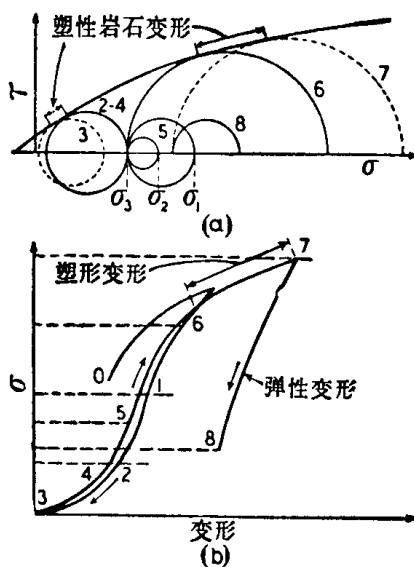


圖 6

- ① 第一次得到岩石的正確的應力-應變圖，是瑞士專家於1921年7月在阿姆斯特格(Amsteg)隧道測驗的結果。參看參考文獻[4]。

线上，如 2、4、8 这几点，当荷载减低时，则岩石又开始发生塑性变形。这几点是用以计算正交于 σ_1 的应力 σ_3 的（塔洛布尔氏方法）。

能在岩石不透水的压力隧道内或钢板衬砌的压力隧道内进行试验。在衬砌隧道里的压力 P 是直接测量的，在岩石上的压力 σ_r （径向的）是计算求得的，这时须考虑到衬砌层的厚度和弹性。把压力 P 提高或降低，就可得到应力应变回线，这种回线在应力应变图上表示弹性的和塑性的变形，并用以描繪相应的摩尔圆及其包线。

这种用静水荷载确定摩尔包线 C 的方法，已经在法国马耳果韦特（Malgovert）隧道中使用过。现正在瑞士艾肯地区进行大规模的类似试验。奥地利提罗尔地方在考乌纳尔塔耳（Kauner-tal）也进行试验，但所用方法有所不同。

在裂缝岩石中，可用下列公式：

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2c \cot \phi + \sigma_1 + \sigma_3} = \sin \phi .$$

重复进行与前面所述相似的方法，并在弹性的和塑性的范围内，描繪应力应变回线，就可以估算 c 值和 $\tan \phi$ 值。

曾在波尔特（Bort）坝附近的一条隧道内，使用 300 吨油压千斤顶四座，求出 $c \cot \phi = 10$ 公斤/平方厘米，与 $c = 23$ 公斤/平方厘米，以表示岩石的特征。

法国电力公司进一步发展了千斤顶的用途，现在正使用 50 吨的标准型千斤顶，如塔洛布尔所述^[40]。

用一块小圆板，压在岩石上，而在圆板上加集中荷载所引起岩石内的应力分布，是早已解决的问题。这在岩石内引起局部的过大应力，如塔洛布尔所表明的那样，是足够用以描繪岩石的稟性曲线的。塔洛布尔的千斤顶试验法，或其他相等的试验法，在大型水电站的地址上，肯定是必须采用的。

第三种试验方法是用预应力钢索锚定在岩石中，达到适当的深度。这一方法已在最近一篇文章中叙述过^[35]，并已说明了此