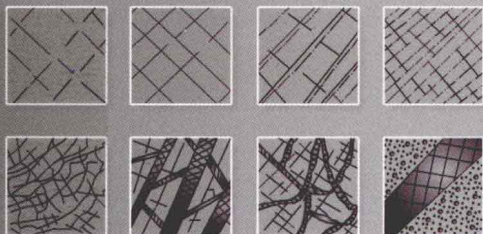


陆家佑 著

# 岩体力学及其 工程应用

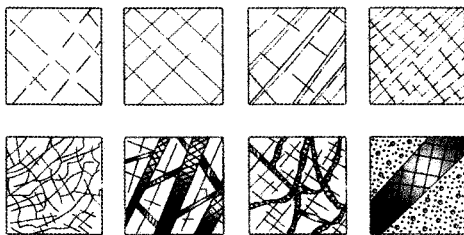
## Rockmass Mechanics



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

# 岩体力学及其 工程应用

陆家佑 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

## 内 容 提 要

本书为岩体力学的基本理论及其工程应用, 简明扼要叙述了作为岩体力学理论基础的弹性理论、强度理论和流变理论; 介绍了岩体中不连续面和含有不连续面的非均匀岩体的力学特征; 以及如何根据岩体力学特性以及工程与岩体相互作用关系, 建立简单实用的力学模型, 把固体力学相关分支融入岩体力学, 并纳入工程应用。

本书工程应用部分理论与工程紧密结合, 着重介绍压力隧洞, 隧洞围岩稳定性和重力坝坝基稳定性方面的研究成果, 对生产单位和研究单位工作人员有一定参考价值, 亦可供研究生和本科生作为教学参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

岩体力学及其工程应用 / 陆家佑著. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2011. 9

ISBN 978-7-5084-8980-3

I. ①岩… II. ①陆… III. ①岩石力学 IV. ①TU45

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第184804号

书 名	岩体力学及其工程应用
作 者	陆家佑 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales@waterpub. com. cn
经 售	电话: (010) 68367658 (发行部) 北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	140mm×203mm 32开本 6.625印张 178千字
版 次	2011年9月第1版 2011年9月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	22.00元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究



## 前 言



岩体力学作为一门学科还十分年青。但是岩石作为建筑材料历史悠久，世界上许多著名的古代建筑物是由岩石建造的，岩石是自然界赋予人类的天然建筑材料，有价廉物美，取之不尽用之不竭，强度高、耐磨、防火等优点。并且只要根据人类的需要切割成形即可，不需任何化学加工。

岩石当做建筑材料，总是选好的岩石切成小块，避开了天然裂隙，强度都很高。因为安全上没有多大问题，对它的力学性质的研究就不迫切。单独取一小块岩石，不包含不连续面，与其他固体有许多共同点，可以当做连续介质，应用连续介质力学处理。

岩体力学真正受到重视与近代工业的发展分不开，大坝基础，地下厂房，压力隧洞，铁路和公路隧道，煤矿和金属矿以及石油开采等工程推动了岩体力学发展。由于工程涉及的范围较大，断层、层面、节理、裂隙等不连续面不可避免，岩体的力学性质和应力传递机制受其影响，这就注定近代岩体力学的研究对象决非岩石小块体，而是包含各种尺度不连续面的岩体，因而连续介质力学的应用是有条件的，对于错综复杂的客观状况必须具体问题具体分析。把经典固体力学与岩体的不连续

性相结合，解决各种实际问题，这就是岩体力学。

本书前6章为岩体力学理论基础，后6章为工程应用。第1章介绍了岩体中不连续面的力学特征。第2、第3、第4章分别叙述了岩体弹塑性理论、岩体强度理论和岩体流变理论。第5章和第6章分别叙述了不连续面呈规律分布的层状岩体和不连续面随机分布的复杂岩体。第7章针对隧洞水压试验反映的岩体各向异性性质，建立了适用于各向异性岩体中压力隧洞衬砌应力计算方法。第8章基于岩体的塑性变形性质和某工程压力隧洞衬砌发生纵向裂缝事故，建立了弹塑性岩体中压力隧洞应力计算方法。第9章回顾了地下工程设计思想的发展，并讨论了地下工程设计的可能发展趋向。第10章叙述岩爆发生的条件并根据岩爆造成的围岩破坏机制建立的产生岩爆的强度准则。第11章首先介绍根据岩爆反分析岩体应力，然后把数值计算方法应用于岩爆预测与治理。第12章叙述有软弱夹层的重力坝在失稳过程的两种力学状况：稳定滑动与粘滑。并根据软弱夹层失稳后的力学特性，建议了失稳准则。

作者

2011年1月10日



# 目 录



## 前言

<b>1 岩体不连续面的力学特征</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 不连续面的变形特性 .....	1
1.3 不连续面的强度特性 .....	5
1.4 不连续面的可能破坏机制 .....	7
<b>2 岩体弹塑性理论</b> .....	8
2.1 引言 .....	8
2.2 岩体应力应变关系 .....	9
2.3 塑性准则 .....	11
2.4 塑性流动(增量)理论 .....	16
<b>3 岩体强度理论</b> .....	31
3.1 引言 .....	31
3.2 Mises 强度理论 .....	32
3.3 Coulomb—Navier 强度理论 .....	33
3.4 Mohr 强度理论 .....	36
3.5 Griffith 强度理论 .....	37
3.6 压应力作用下岩石脆性破坏 .....	41
3.7 脆性岩石破坏准则 .....	42
<b>4 岩体流变理论</b> .....	44
4.1 引言 .....	44

4.2	应力应变时间关系 .....	47
4.3	场方程 .....	59
4.4	粘塑性模型 .....	63
<b>5</b>	<b>层状岩体</b> .....	<b>65</b>
5.1	引言 .....	65
5.2	层状岩体的弹性本构定律 .....	65
5.3	层状岩体的弹塑性本构定律 .....	66
5.4	层面的弹塑性本构定律 .....	67
5.5	层状材料 .....	71
5.6	粘滑机制力学模型初步分析 .....	72
<b>6</b>	<b>岩体力学模型的建立</b> .....	<b>75</b>
6.1	引言 .....	75
6.2	两种力学状态 .....	76
6.3	岩体不连续力学状态 .....	80
6.4	岩体连续力学状态 .....	81
<b>7</b>	<b>各向异性岩体中压力隧洞衬砌应力计算</b> .....	<b>83</b>
7.1	引言 .....	83
7.2	基本方程 .....	83
7.3	三个特例 .....	87
7.4	圆形压力隧洞衬砌应力分析 .....	89
7.5	岩石流变性质的影响 .....	94
7.6	算例 .....	95
<b>8</b>	<b>弹塑性岩体中圆形压力隧洞衬砌应力计算</b> .....	<b>96</b>
8.1	引言 .....	96
8.2	岩体的应力应变关系 .....	97
8.3	均匀内压力作用的圆形孔口弹塑性应力分析 .....	97
8.4	隧洞衬砌应力计算 .....	101
8.5	隧洞放空和再加载过程中岩体和衬砌的工作状况 .....	102

8.6	岩体力学参数 .....	104
8.7	算例 .....	104
<b>9</b>	<b>岩体力学在地下工程设计中的应用 .....</b>	<b>107</b>
9.1	引言 .....	107
9.2	隧洞设计理论的发展 .....	107
9.3	岩体力学性质与洞室围岩稳定性 .....	110
9.4	地下工程中待深入研究的课题 .....	117
<b>10</b>	<b>洞室围岩岩爆机制与发生准则 .....</b>	<b>123</b>
10.1	引言 .....	123
10.2	洞室应力状态对岩爆的影响 .....	123
10.3	洞室围岩脆性破坏 .....	125
10.4	圆形洞室岩石脆性破坏物理模拟 .....	134
10.5	岩爆发生准则 .....	139
10.6	岩爆烈度 .....	143
<b>11</b>	<b>岩爆预测与治理的工程应用 .....</b>	<b>146</b>
11.1	引言 .....	146
11.2	天生桥水电站隧洞岩爆造成围岩失稳 .....	146
11.3	由岩爆反分析确定岩体初始应力 .....	150
11.4	岩爆数值预测 .....	152
11.5	岩爆的治理 .....	157
11.6	鲁布革水电站地下厂房围岩稳定分析 .....	162
11.7	岩爆治理对策 .....	167
<b>12</b>	<b>重力坝坝基稳定性 .....</b>	<b>172</b>
12.1	引言 .....	172
12.2	朱庄水库坝基抗滑稳定分析 .....	172
12.3	铜街子水电站坝基抗滑稳定分析 .....	185
12.4	坝基抗滑稳定安全准则 .....	193
	参考文献 .....	195
	中外文人名对照表 .....	202



# 1 岩体不连续面的力学特征

## 1.1 引言

鉴于不连续面在岩体中的作用，它们对岩体中工程的安危至关重要，在对岩体作应力计算和稳定分析时必须考虑，这也是岩体与作为建筑材料的岩块不同之处，没有不连续面的岩块可以用经典固体力学处理，而计算单元内只含有小的不连续面的岩体，能否用连续力学处理就不一定，必须弄清它们的力学性质。如果计算单元内有大的、影响全局的不连续面，更需要特殊对待。

首先，必须认识岩体中的不连续面。

## 1.2 不连续面的变形特性

岩体中的不连续面对它的应力分布影响甚大，进行应力分析时必须考虑。在用数值方法分析应力场时，对于均匀介质计算精度很高，至于不连续岩体，计算精度取决于不连续面空间分布及其变形特性的认识程度。在一个计算单元中，如果只有小的不连续面，只要取得包含这些不连续面在内的岩体应力应变关系即可。对于对稳定性起控制作用较大的不连续面，还需要弄清楚不连续面本身的变形特性。

以往，用极限平衡理论计算抗滑稳定性时，由不连续面剪切试验得到的变形曲线，仅用了曲线上的某些特征点选择强度参数。对于应力计算，还需要据此建立不连续面的力学模型并确定变形特性参数。此外，除了切向变形特性外还需要弄清楚不连续面法向变形特性。

不连续面的变形特性受围压、孔隙压力、温度、不连续面的



几何状况、夹泥层厚度，以及围岩的力学性质和矿物成分等因素的支配。

一条不连续面，如果不受正应力作用，则施以不大的剪应力就会滑动，像理想塑性介质。在正应力作用下，应力变形曲线的斜率随正应力大小而变化，即变形  $u$  是正应力和剪应力的函数， $u=f(\sigma, \tau)$ 。正应力愈高，其线性范围也就愈宽，见图 1.1 (a)。有一些不连续面，当正应力在某一范围内，变形曲线的斜率异常接近，只是极限值有高低之差，见图 1.1 (b)。这种情况下，变形只是剪应力的函数， $u=f(\tau)$ 。

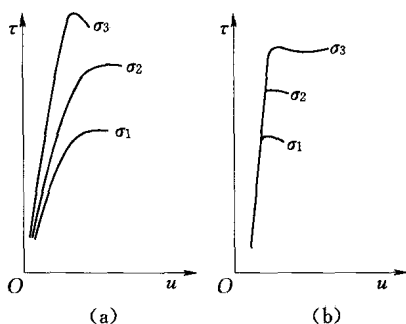


图 1.1 剪应力与剪切变形关系

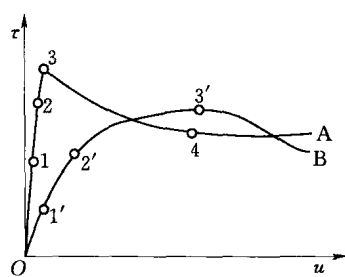


图 1.2 脆性破坏与塑性破坏时剪应力变形关系

尽管不连续面的应力变形关系很复杂，但是根据完整的变形曲线，可以归结为两种情况：①脆性破坏（图 1.2 中的曲线 A）；②塑性破坏（图 1.2 中的曲线 B）。脆性破坏又称粘滑，塑性破坏又称稳定滑动。

脆性破坏的变形特点是：在受力初期呈线性，不连续面两侧岩石切向变形连续，这一阶段终于点 1，这时不连续面开始开裂。此后，随看剪应力增加，不连续面上的裂缝继续扩展，最终全部错断；第二阶段起于点 1，止于点 2；第三阶段，两侧岩石沿不连续面摩擦滑动，至点 3 达到极限状态，应力突然下降至点 4。塑性破坏过程为稳定滑动。与脆性破坏不同的是，到达点 3' 后不产生突然的应力降。脆性破坏过程中，粘滑现象可能反复出



现，见图 1.3、图 1.4。前者由三轴压力装置对有天然不连续面和人工锯开不连续面的小块岩样得到，后者是直剪试验的一个例子。

对不连续面的两种变形特性的研究在生产实践中意义较大。在地震学中粘滑被认为是一种地震机制，围绕着弄清楚产生粘滑的条件，

做了许多工作，地震学中侧重于高温和高围压条件进行工作。至于工程中不连续岩体的应力分析，如何建立合理的不连续面力学模型，首先要弄清楚不连续面的变形特性，反映粘滑和稳定滑动的力学模型是不一样的，特别是为了实际计算中简单易行，力学模型的简化更需要根据变形曲线有的放矢。坝基稳定分析是常温、常压问题，对不连续面变形特性影响较大的是不连续面的粗糙度和充填物的物理力学性质、裂隙水压力等。

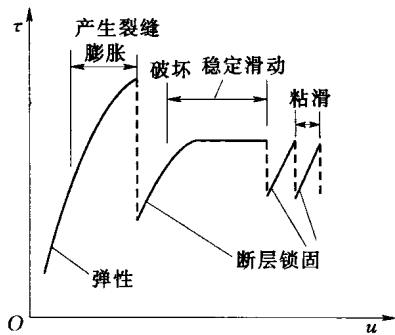


图 1.3 稳定滑动与粘滑

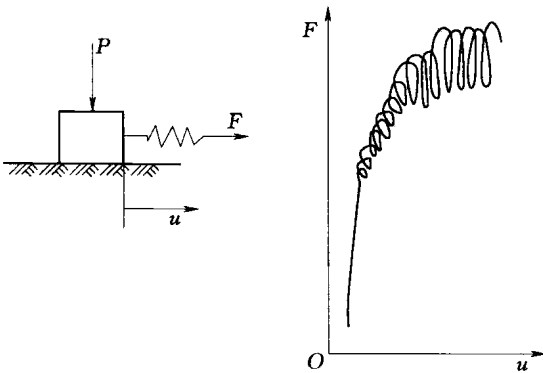


图 1.4 粘滑好比用一水平力通过一个弹簧拉一块体，起初弹簧受力，块体不动，待力  $F$  克服块体摩擦之后，块体突然向前跳跃。力  $F$  部分松弛， $F$  再加过程中上述现象又会重现



当剪应力为常数，不连续面的正应力  $\sigma_n$  与垂直变形  $v$  的关系如图 1.5 所示。可以看出压缩变形有一极限值，到达此极限以后，正应力增加，变形不再增加，此后不连续面法向的物性关系与围岩相同。当然，围压愈高，抗滑能力愈高。还可以看到，不连续面在拉应力作用下，拉伸变形很小，拉应力到达极限抗拉强度后，不连续面拉开，岩体不再传递拉应力。

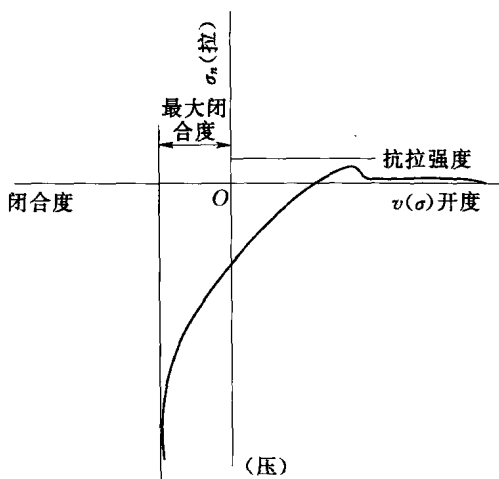


图 1.5 剪应力为常数，不连续面闭合度  
与正应力关系  
 $v(\sigma)$  — 垂直变形

此外，不连续面剪切过程中，开始产生裂缝时，岩体发生膨胀，图 1.6 表示不连续面受剪应力作用后的三个发展阶段，图 1.6 (a) 相当于线性阶段，即图 1.2 中 O—1 阶段。图 1.6 (b) 相当于图 1.2 中的 1—2 阶段，即开裂（膨胀）阶段。图 1.6 (c) 相当于图 1.2 中的 2—3 阶段，即摩擦阶段。

图 1.7 表示法向应力为常数时，剪切过程中剪切变形与膨胀的关系，膨胀与法向应力也有关系，正应力大于临界应力之后，剪切过程不出现膨胀而是压缩，并且压缩趋向一极限值。图 1.7 中  $\sigma_T$  是不产生膨胀的临界正应力。



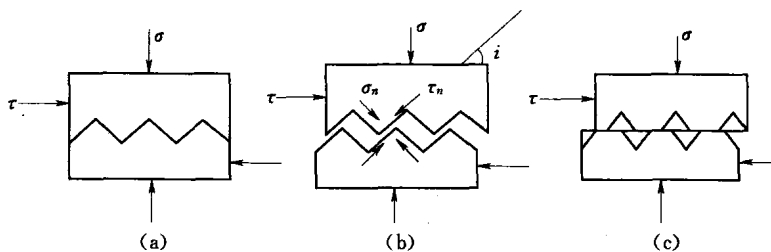


图 1.6 不连续面受剪应力作用后的三个发展阶段

(a) 第一个发展阶段; (b) 第二个发展阶段; (c) 第三个发展阶段

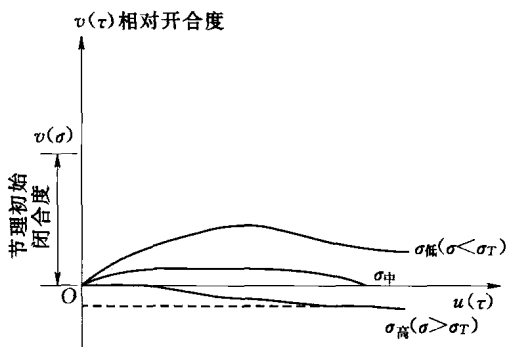


图 1.7 不连续面在剪切过程中还会引起法向变形, 它可能是膨胀, 也可能是压缩

$\sigma_T$ —不产生膨胀的临界应力;  $v(\tau)$ —剪应力引起的垂直变形;  $u(\tau)$ —一切向变形

### 1.3 不连续面的强度特性

岩体中的不连续面, 是地壳在应力长期作用下破坏后的遗迹, 地壳经过多次运动之后, 岩体应力的方向、大小都发生了变化, 并且由于围岩相互约束, 不连续面受正应力的作用, 仍具有一定抗剪能力。

不连续面的强度总是小于围岩强度, 它的抗拉强度特别低, 没有充填物的不连续面没有抗拉强度, 有充填物的不连续面抗拉强度取决于充填物的抗拉强度。

不连续面的抗剪强度比较复杂, 一般而言, 有一定粗糙程度的不连续面, 没有充填物者抗剪强度最高, 充填物薄者次之, 充



填物厚者最低。接触面的状况必然会强烈地影响到滑动机制，不连续面中充填泥化夹层，往往趋向稳定滑动，没有充填物而粗糙度较大者容易产生粘滑。

没有充填物的不连续面，光滑接触面的强度最低，随着粗糙度增加，强度亦提高。如果把粗糙面典型化为规则的锯齿状（图 1.6）得

$$\left. \begin{aligned} \tau_n &= \tau \cos i - \sigma \sin i \\ \sigma_n &= \sigma \cos i + \tau \sin i \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

假定锯齿面的滑动破裂服从 Coulomb-Navier 准则；并假定  $C=0$ ，则

$$\tau_n = \sigma_n \tan \varphi \quad (1.2)$$

将式 (1.1) 代入式 (1.2)，不连续面的滑动破坏准则

$$\tau = \sigma \tan(\varphi + i) \quad (1.3)$$

式中  $\varphi$  —— 锯齿面的内摩擦角；

$i$  —— 锯齿面与水平方向的夹角。

式 (1.3) 相当于图 1.8 中的锯齿面膨胀阶段。当  $\sigma$  较大，锯齿面剪断并沿平面摩擦剪切，其剪断准则为

$$\tau = C + \sigma \tan \varphi \quad (1.4)$$

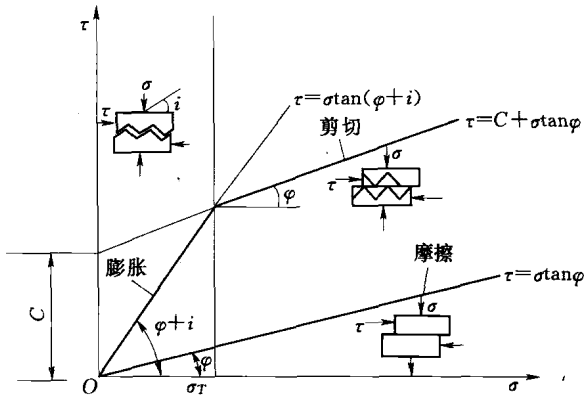


图 1.8 剪切破坏三个过程——膨胀、剪断、摩擦



对于没有充填物的不连续面， $C$  值是一个视凝聚力。由此可以看出不连续面的粗糙度不仅影响到滑动机制，对剪切强度的影响也很大，其影响程度受正应力  $\sigma$  的大小而有所不同。此外，接触面的初始状况也有影响，开始处于密合状态的接触面，剪切膨胀可以提高抗剪能力。反之，开始处于松散状态的接触面，受剪后闭合（图 1.9）这一阶段体积收缩，会促进剪切滑动，这时滑动准则为

$$\tau = C - \sigma \tan \varphi \quad (1.5)$$

以上讨论是建立在 Coulomb - Navier 理论上的。

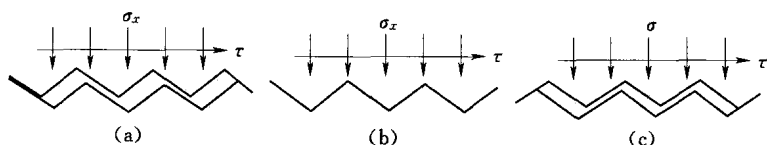


图 1.9 开始处于松散状态接触的剪切过程

(a) 起始松散状态；(b) 密合状态；(c) 膨胀再次松散状态

## 1.4 不连续面的可能破坏机制

岩体中各种断裂面的分布错综复杂，岩石物性的非均质以及应力分布不均匀，岩体的破坏机制势必也十分复杂。甚至同一条不连续面，由于各分段的粗糙程度或充填物不同，都影响到它的破坏形式。

如图 1.10 所示，表示一种简单的情况，一条粗糙程度不均匀的不连续面，相当于一系列椭圆形扁孔穴连续排列，不连续面一侧的端部有一组小裂隙（图 1.10 中实线表示的裂隙  $a$ ）。当不连续面滑动时，剪切位移不均匀，裂隙  $a$  延伸。另外，各个椭圆形孔穴尖端脆性破裂，产生另一组裂缝  $b$ ，它们向外作稳定传播。这两组裂隙均沿主应力方向传播。

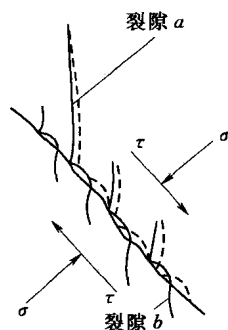


图 1.10 不连续面可能破坏机制



## 2 岩体弹塑性理论

### 2.1 引言

平衡方程

$$\sigma_{ij,j} + \rho X_i = 0, \left( \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \right) \quad (2.1)$$

几何方程

$$\delta_{ij} = \frac{1}{2} (u_{j,i} + u_{i,j}) \quad (2.2)$$

是固体必须服从的基本方程式。固体还必须遵循的另外一个方程——本构方程，因材料而异。固体力学中的各个分支的区别，也只是它们的本构定律不同，只有当它们都处在弹性状态时，才服从的共同 Hooke 定律。因此，岩体的本构定律是岩石力学的主要研究任务之一。

由于岩体是地质材料，它是由各种地质结构面以及被它们切割的完整（或较为完整）的岩石组成的复合介质。因此，岩体好比堆砌的积木，其性质可能呈弹性、塑性、粘弹性、粘塑性或脆性破裂的积木块堆砌而成，它们之间的缝隙也可能是自由接触、有充填物或粘接，缝隙的力学性质甚至比积木块更复杂，它们也具有积木块类似的各种属性。

无论实验室岩块试验或是原位试验，都表明岩石的塑性变形十分突出，地下建筑物围岩变形，坝基变形和边坡滑动都显示了岩体塑性变形不可忽视。地质现象中，大地构造的各种运动留下了许多岩体塑性变形的痕迹。

因此，要精确地计算各种工程对岩体扰动后在新的应力条件下岩体是否稳定，以及保证岩体维持稳定的必要条件，并据此作





出经济、合理的工程设计，充分研究岩体的塑性性质十分重要。通过地壳构造的遗迹从力学领域去研究地球的去，塑性力学也很有价值。

岩体力学中塑性理论包括两个方面：一是建立岩体屈服准则和应力应变关系；二是发展包括塑性变形在内的岩体应力分析的数学方法。经典塑性理论的建立主要是根据金属的属性，它的特点是屈服不受静水应力状态的影响。塑性理论中考虑到岩石属性是最近的事。岩石进入塑性状态受静水应力影响。

## 2.2 岩体应力应变关系

从单向压缩试验中知道，应力在弹性范围时，加载与卸载都服从 Hooke 定律，即变形是可逆的。超过弹性极限以后产生塑性变形，外荷载卸去以后，卸载过程中应力应变关系服从 Hooke 定律，与其相对应的塑性变形不会消失。再加载时就需要考虑初始应变  $\epsilon^p$ ，再加载过程中，到达上一次开始卸载的应力后，重新产生塑性变形。

初次出现塑性变形的应力叫初始屈服极限，再加载时重新产生塑性变形的应力叫后继屈服极限。后继屈服极限大于初始屈服极限的这种现象叫应变强化，后继屈服极限与初始屈服极限相同，就是理想塑性（图 2.1）。

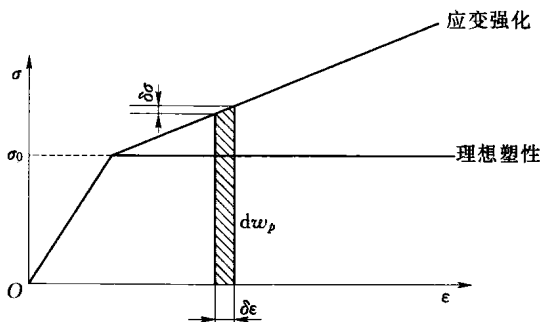


图 2.1 弹塑性应力应变关系

