

87307

公路工程参考资料

第十二輯

人民交通出版社

公路工程参考資料

(第十二輯)

人民交通出版社

本輯系由近年美国公路研究所年报中摘譯的七篇文章而輯成；內容主要介紹了有关瀝青材料的試驗方法，以及三軸壓縮試驗在柔性路面計算中的应用等等。

本書可供道路科研工作者、道路工程技術人員及有关院校師生参考。

公 路 工 程 参 考 資 料 (第十二輯)

*

人 民 交 通 出 版 社 出 版

(北京安定門外和平里)

北京市書刊出版業營業許可証出字第〇〇六号

新华书店北京发行所发行 全国新华书店經售

人 民 交 通 出 版 社 印 刷 厂 印 刷

*

1964年10月北京第一版 1964年10月北京第一次印刷

开本：787×1092 $\frac{1}{32}$ 印張：6 張 插頁2

全書：128,000字 印數：1—3,000册

統一書号：15044·1491

定价(科六)：0.80元

目 录

摩尔图和庫伦方程式.....	N.W.麥克廖特著	2
三軸压缩試驗結果在柔性路面厚度計算中的应用	E.S.巴帕尔著	27
用以測定瀝青混合料塑性性质的三軸剪切試驗方法	L.W.尼契卜著	56
用粘弹性原理对地瀝青混凝土三軸試驗数据的分析	K.E.塞柯尔 C.L.莫尼斯密司著	90
由車輪荷載引起的路面弯沉的光学測量	G.施尼特 F.米勒著	114
瀝青混合料的强度和体积变化的性质	J.H.紹普 W.H.高茨著	130
瀝青混凝土伸张和压缩試驗中的强度性质	E.R.哈尔格特 E.E.強生著	173

摩尔图和庫伦方程式

N.W. 麥克摩特 著

摘 要

本文論述了目前所存在的关于庫伦公式、摩尔图的意义和它們之間的关系的流行着的不同的意見，并回顾了某些土壤或类似材料的受应力的最簡單情况，其庫伦包綫、主应力和摩尔包綫都是直綫。本文提出了两个主要的結論。对于一給定的材料，由直接剪切試驗数据所得到的庫伦包綫和由三軸試驗所得到的摩尔包綫将是一致的，假使材料的同样的試样在两种試驗中承受同样的条件的話。这些材料的各以主应力，或以法向应力、剪应力和剪切强度之間的关系，或以內摩擦角，或以破坏平面与大的或小的主平面之間的角，或以上述两个或更多的因素的組合为基础的各种稳定理論，实际上是互为补充的理論，对于有关这些材料的任何稳定問題提供了一致的答案。

由于对使用三軸試驗于解决公路和机場工程問題的兴趣日益增加，所以对于用以分析三軸数据的摩尔图的意义，以及关于庫伦图和摩尔图之間关系的性质取得相同的看法就十分重要。本文的目的在于促进有关这些方面的討論。

对于出現于土壤力学的技术文献里的庫伦方程式和摩尔图，以及上述两者之間的关系虽有不少論述，但是对于它們的意义，看来尙未有完全一致的看法。

应用三軸試驗以解决一般土力学的問題，特别是用以解决

公路和机场工程范围内路基、基层和柔性路面设计中的问题日见增加，对利用摩尔图以分析三轴试验数据便由此而引起了更多的重视。因之，对于应用于此目的的摩尔图的意义，以及相应的摩尔图和库伦图之间的关系，应取得相同的看法是非常必要的。本文的主要目的就在于促使持有这些方面意见的人展开讨论。

在开始这个讨论前，笔者主要根据几个不同的资料来源，简明地提出他本人对于有关库伦方程式、摩尔图，以及它们之间关系的若干重要原理的理解。

这里提出的仅限于最简单情况，它属于作以下假定的某些土壤和类似材料的受应力的情况：

1. 在通过一点的不同平面上的各应力之间的关系，服从工程力学的定律；

2. 破坏情况时的应力数据能用库伦直线、主应力和摩尔包线表示之；

3. 材料兼具粘聚力和內摩擦力；

4. 在通过一点或材料-受荷单元体的每一平面上所测定的 C 和 φ 值是相同的；

5. 测定的 C 和 φ 值，与材料在受荷达破坏前所承受的任何应力状态无关。

除非将作为根据的假设予以清楚的阐明，否则由于缺乏任何共同的基础来比较和评价不同的观点，对于库伦图和摩尔图的意义，以及它们之间的关系，就很难进行合理的讨论。

上述第一个假设见诸工程力学的教科书中，而且仅仅说明，例如，作用于通过一点的主平面上的应力，与作用于通过该点的任何其他平面上的剪应力和法向应力之间，具有一确定的关系。

虽然曾提出好几种理論，例如，最大法向应力理論、最大法向应变理論、最大剪应力理論，等等，来解释不同物质在荷载下的破坏作用，而土力学教科书看来较为同意庫伦的内摩擦理論，对土壤材料的破坏能提供最好的解释。即使在剪应力和法向应力数据繪成一曲綫时，仍常常通过各点繪出一最好的直綫，以便于实际問題的解决。虽然摩尔的破坏理論亦以内摩擦观点为基础，但較庫伦理論更为概括。它将剪应力与法向应力之間关系的性质留待实验去测定，而并不規定摩尔包綫必須为一直綫，如庫伦方程式 $S = C + n \tan \varphi$ 所要求的。但是，经过仔細測得的許多土壤的剪应力和法向应力的数据似乎可繪成直綫，对于这些土壤，庫伦直綫、主应力和摩尔包綫的假設看来是合理的。

某些缺乏内摩擦力的粘性土壤，具有与横軸平行的庫伦包綫或摩尔包綫。无粘性的土壤，如砂和砾石，具有内摩擦力，当它們完全缺乏粘聚力时，其庫伦或摩尔包綫趋向于通过原点。公路和机场工程师所遇到的許多土壤和柔性基层和路面的材料，兼具粘性和内摩擦力。后面这些材料在本文中被认为代表一般的情况。

应再次強調，本文的主旨仅限于討論最簡單的比較情况下的庫伦图和摩尔图，以及它們之間的关系；最簡單的比較情况系指限于符合于上述五項假設的受荷的土壤或类同材料。

在全文和附图內，所有的力都是以每平方吋的磅数或类似的强度单位計的单位应力。

受荷单元体上的各应力

虽然“在一点上的各应力”这一名詞常用于土力学教科书內，但也常慣于将“点”扩大到具有两个或三个尺度的小单元

体。通过該小单元体的平面上的各应力之間的关系，能比通过一点的平面上者更容易看得清楚。

图1-1表示承受主应力 V 和 L 的土壤的一个小单元体。如果横向压力 L 維持不变，而垂直荷载 V 逐渐增加，結果会沿着通过該单元体的一个平面产生破坏。若以不同的 θ 值表示通过該单元体的不同平面与垂直方向之間的角度，則根据庫伦的

破坏理論，破坏平面的特殊 θ 值为 $\theta = 45 - \frac{\varphi}{2}$ ，式中 φ 为材料的內摩擦角。

主应力 V 和 L 的施加，在通过該单元体的所有平面上产生剪应力 S_s 和法向应力 n 。在破坏平面上所产生的剪应力和法向应力示如图1-1。

从图1-1可以清楚地看到，沿着通过該单元体的任何平面而作用的剪应力 S_s ，为主应力 V 和 L 沿該平面作用的分力的代数和。同样地，作用于通过該单元体的任何平面上的法向应力 n ，为主应力 V 和 L 的垂直于該平面的分力的代数和。因之，作用于一单元体上的各主应力，与通过該单元体的任何平面上所产生的剪应力和法向应力之間，有一非常密切的关系；反之亦然。所以，根据三軸試驗数据所提供的該单元体在开始破坏时相应

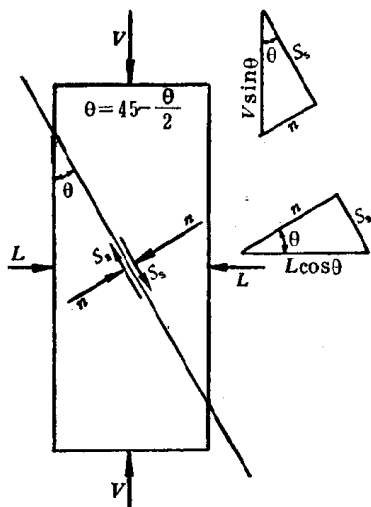


图1-1 在一受荷单元体上的主应力、剪应力和法向应力

的 V 和 L 值，可以算出在破坏平面上所产生的相应分力—剪应力 S_s 和法向应力 n 。相反地，由直接剪切试验数据所提供的沿着通过材料的破坏平面在开始破坏时相应的 S_s 和 n 值，也能算出相应的主应力 V 和 L 值。

按年代来说，直接剪切试验要比三轴试验早得多，故将首先予以讨论。

直接剪切试验和库伦包线

图1-2 (A) 中围绕一部分破坏平面的小长方形盒，引人注意的这一事实，即：虽然在直接剪切试验时，对受荷试样所施加的应力为在破坏平面上的剪应力 S_s 和法向应力 n ，但它们与相应的主应力 V 和 L 有密切的关系。

图1-2 (B) 说明直接剪切试验的原理。最常见的形式之一为在其中置入要试验材料的剪切盒。剪切盒的上面一半可以相对于下面一半移动，而使试样沿着盒子的上下两半之间的平面受到剪切。某一给定数值的法向应力 n 施加如图所示，并测定引起破坏的剪应力 S_s 。对同一材料的其他同样试样进行重复的试验，而对每一试样施加不同的法向应力。在破坏情况下的最后法向应力和剪应力数据绘如图1-2 (C)。通过各数据的直线称为库伦包线。该线在纵轴上所截的段落称为粘聚力 C ，而库伦包线与水平轴间之角为内摩擦角 φ 。因此，库伦包线为库伦方程式

$$S_s = C + n \tan \varphi \quad (1)$$

的图解，上式中 S_s = 材料的抗剪强度，其他符号的意义已见上述。应该很清楚地看到，在平衡（开始破坏）情况时，对于任何给定的法向应力 n ，在破坏平面所能施加的最大剪应力 S_s 必须等于在该平面上的能产生的材料的抗剪强度 S_s 。

附帶地說一下，許多有关纵軸被庫伦包綫所截一段的意义（已公认为粘聚力 C ）的討論可以得到簡化，假使能常常記住，此截段是在实际上代表了法向应力为零的情况下，材料到所能产生的最大抗剪强度，如图1-2 (C) 庫伦图所示。

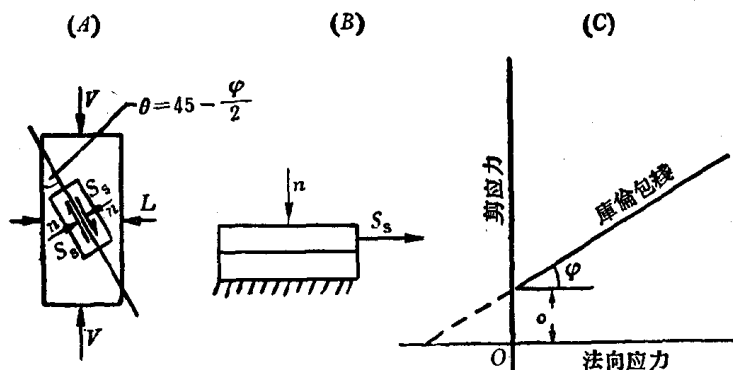


图1-2 直接剪切試驗和庫伦包綫

对于許多土壤材料，将得自直接剪切試驗数据的 S_s 对应于 n 作图，結果常为一曲綫而非如图1-2 (C) 所示之直綫包綫。但是，如已在引言中所強調者，本文所考虑者仅为后一种情况。

图1-2 (C) 中庫伦包綫在纵軸右側的部分，能容易地从直接剪切試驗数据中定出，因所施法向应力 n 起压缩作用。在實驗室进行直接剪切試驗时，对一土壤試样通常所能施加的最小法向应力为 $n=0$ ，图1-2 (C) 中的纵軸即說明此点。

由于土壤材料的性质，在實驗室里很难向它們施加均匀的张（拉）应力。为此，这就难于核对庫伦包綫在纵軸左側的位置，因为这需要在进行直接剪切試驗时施加負的均匀法向应力，亦即起伸张作用的法向应力。因之，在图1-2 (C) 以及以后的各图中，庫伦包綫在纵軸左側的部分均用虛綫表示，以

着重說明其确实位置尙未經土壤材料的真正試驗数据所証明。此左側虛綫部分之被繪成纵軸右側的庫伦包綫部分的延續綫，仅仅是因为如对之能施加张应力的混凝土和鋼等材料，在纵軸各側的庫伦包綫的位置已为真实的試驗数据所确定（图1-6）。又須強調說明，我們之不可能核定土壤材料的庫伦包綫在原点左側部分的位置，是由于我們還不可能做出符合于本目的的試驗儀器。但这并不是說在自然界或現場的真实的工程結構內，在某种情况下不会产生起伸张作用的法向应力。

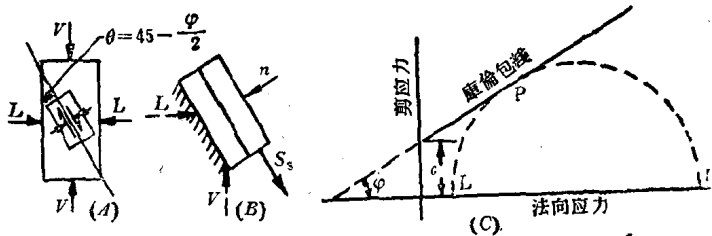
在得到图1-2 (C) 的直綫庫伦包綫后，次一步驟为在此图上确定主应力 V 和 L 的位置，如属可能的話。

图1-3着重于說明 S_s 和 n 为主应力 V 和 L 的分力，以及虽然在直接剪切試驗中真正施加于試样和測得的为剪应力 S_s 和法向应力 n ，而实际上已包含了当試驗进行时有相应的主应力 V 和 L 的存在。

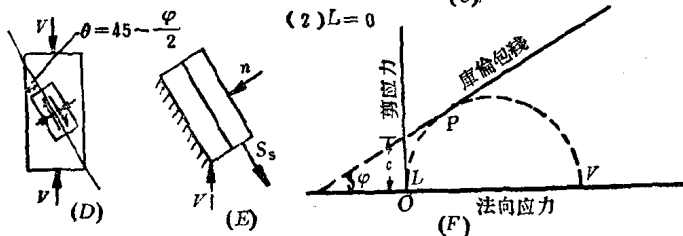
在图1-3 (A)、(D)、(G) 和 (J) 中的受荷单元体上，分別表示了在四种不同应力情况下所作用的主应力、法向应力和剪应力。图1-3 (B)、(E)、(H) 和 (K) 中的直接剪切試驗图各表示了四种情况中所作用的剪应力 S_s 和法向应力 n ，以及所包含的相应地作用着主应力 V 和 L 的方向。图1-3 (B)、(E)、(H) 和 (K) 中的直接剪切試驗图被繪成傾斜的位置，分別平行于图1-3 (A)、(D)、(G) 和 (J) 中的破坏平面的方向。这样使兩組图內的主应力、剪应力和法向应力处于平行的位置和方向上，而使它們較易于辨認。

大約七十年以前，摩尔〔7〕論証了一个方法，由該方法可以求得相应的主应力 V 和 L 的大小和方向，假使剪应力 S_s 和法向应力 n 系在平衡（开始破坏）的情况下測得；代表剪应力和

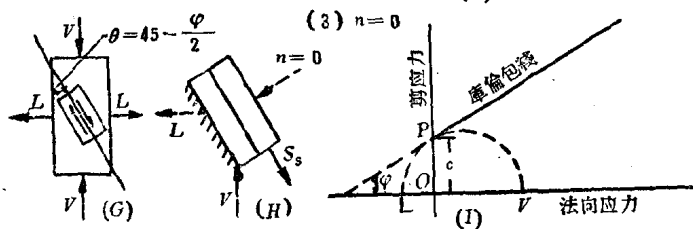
(1) 一般



(2) $L=0$



(3) $n=0$



(4) $V=0$

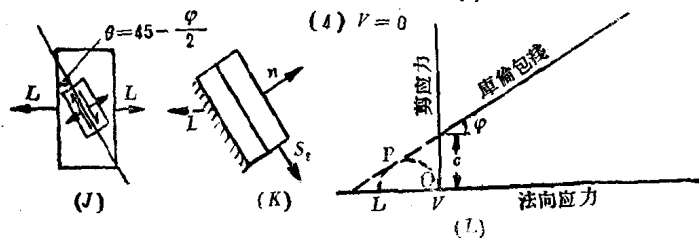


图1-3 从直接剪切试验数据推导主应力

法向应力任何给定组合的坐标值的一点标示于库伦包綫上，亦即图1-3(C)中的 P 点。通过該点，繪一切于庫伦包綫以及其直径沿法向应力軸的半圓。半圓与法向应力軸的交点代表相应于 P 点所表示的剪应力和法向应力的主应力 V 和 L 之值。在此图解步骤中，沒有包含任何假設，根据对作用于图1-1或图1-3(A)等中的受荷单元体上各应力所作的考虑，能导出关于主应力、剪应力、法向应力、破坏角 θ 等之間的完全相同的关系，其証明将在后面联系到图1-12时提出。

因此，图1-3(C)系对于 S_s 、 n 、 V 和 L 均为正值的情况(1)，提供了作用于图1-3(A)和(B)中的主应力、剪应力和法向应力的大小和它們之間的关系图解。图1-3(D)、(E)和(F)为有关情况(2)(属于无侧限压缩)的应力情况，其中 S_s 、 n 和 V 为正值，而 $L=0$ 的情况(3)(包括了法向应力 $n=0$ 的情况)由图1-3(G)、(H)和(I)所表明，其中剪应力 S_s 和大主应力 V 为正值，而小主应力 L 为負值。亦即 L 起伸张作用。图1-3(J)、(K)和(L)，属于情况(4)，表示抗张强度的情况。剪应力 S_s 为正值和 $V=0$ ，而 n 和 L 均为負值，亦即起伸张作用。

应该再次审慎地注意，由于受目前实验设备的限制，情况(4)所代表的应力情况对于土壤材料不能用試驗加以証明，因为包含有伸张的法向应力在內。但是，包括图1-3情况(1)、(2)、(3)的直接剪切試驗，能十分容易地在实验室内进行。特别引起兴趣的是情况(3)，其中正应力 $n=0$ ，而与之相应的小主应力 L 为負值，因此，起伸张作用。

三軸試驗和摩尔图

在图1-4(A)用图表示的三軸試驗內，一受有橫向压力 L

的圆柱体試样，受到不断增加的垂直荷載 V 的作用，直至其破坏为止。同样的試样在其他大小的横向压力 L 值下进行同样的試驗。最后得到的相应的 V 和 L 值能繪成如图 1-4 (B) 的主应力图的形式。就本文而言，仅考虑那些在 V 和 L 之間为如图 1-4(B) 所示的直綫关系的土壤和柔性路面材料。

取用直接由三軸試驗所提供的，或者取自图 1-4 (B) 的直綫关系的 V 和 L 值，能繪出如图 1-4 (C) 所示的諸摩尔图。为此目的，沿法向应力軸定出每一情况的相应的 V 和 L 值，而 $V-L$ 之差成为一个所謂摩尔圓的半圓的直径。

从图 1-4(B) 的直綫关系可以清楚地看到，有无数的相应的 V 和 L 值可以选出。当取定很多数量的这些值并繪于一个摩尔图上时，其結果如图 1-4(D) 的諸摩尔圓。选定无限数量的相应的 V 和 L 值时，繪出的諸摩尔圓靠得极近，于是得到图 1-4(E) 的摩尔图。由图 1-4(E) 的摩尔圓所形成的上界成为一条所謂摩尔包綫的直綫，該綫很明显地切于每一个摩尔圓。

可以看到，图 1-4(D) 和 (E) 中摩尔包綫的左端点由代表无側限抗压强度（横向压力 $L=0$ ）的摩尔圓的切点所表征。然而，必須反对任何这样的解释，如认为摩尔包綫系終止于此点或在此点改变其方向。这仅仅是表明，在目前的三軸試驗設各的条件下，还不可能去揭示在代表无側限抗压强度的摩尔圓的切点的左面摩尔包綫的位置。这是由于我們目前还不可能在三軸試驗中对土壤試样施加均匀的負的横向压力 L （即 L 起伸张作用）。要用三軸試驗的方法来实验确定在代表无側限抗压强度的摩尔圓切点左面的摩尔包綫的位置，显然需要有更在左面的諸摩尔图；而繪制这些摩尔图所需的試驗数据，只有在可以施加均匀的負的横向压力 L 的条件下才能得到。

自然界土壤的应力并不受三軸試驗的限制，在現場，有时

毫无疑问会产生相当于将图 1-4(E) 摩尔包线向左延展时所代表的应力情况。图 1-5 中用图绘出的四种情况，可以更清楚地了解这一观点。

图 1-5 的情况 (1) 包括了垂直应力 V 和横向压力 L 均起压缩作用的一般情况。情况 (2) 描绘了对于当小主应力 $L=0$ 时，无侧限压缩所包含的应力状况。情况 (3) 属于在土壤的三轴试验中一种难于得到的荷载情况，因为这要求小主应力 L 必须起伸张作用。应力 V 和 L 是这样选择的，以致在破坏平面上的法向应力 n 为零 ($n=0$)，如图 1-5 (F) 所示。由于图 1-5 的情况 (3) 很难用三轴试验仪器得出，因此，可以从图 1-3 的情况 (3) 回顾到，这种应力情况可以很容易用直接剪切试验的方法得到。这说明将摩尔包线至少延展至其与纵轴的相交点是合理的。图 1-5 情况 (4) 表示了抗张强度的情况。由情况 (4) 所代表的应力情况对于土壤材料不能用试验方法来核对，因为目

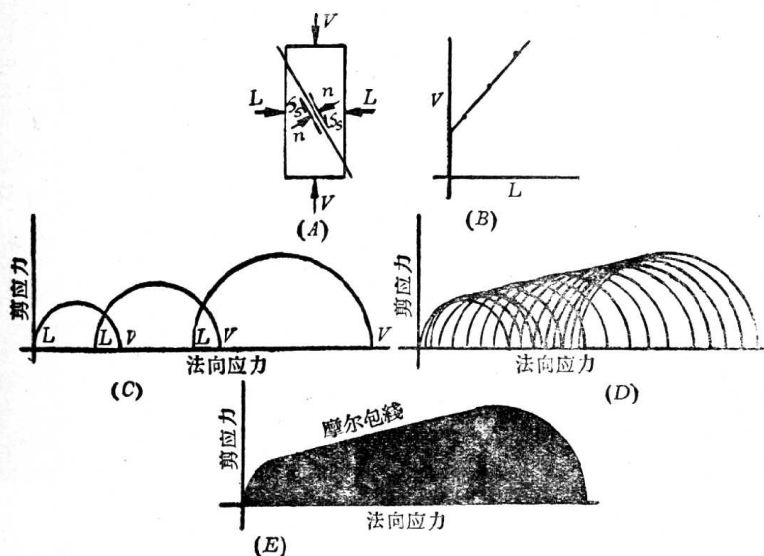


图1-4 主应力和摩尔图

前三軸試驗的實驗儀器不能均勻地施加所需的張應力。因之，在圖1-5和以後的各圖中，摩爾包綫在縱軸以左的部分均以虛綫表示之。

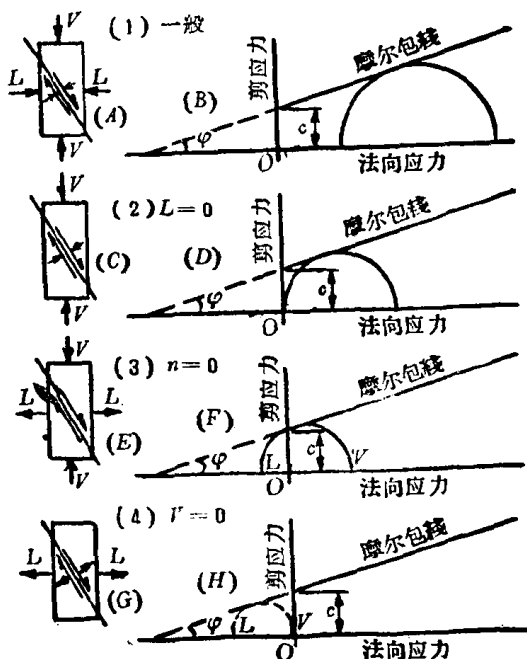


圖1-5 不同荷載情況的摩爾圖

雖然對土壤材料不能以情況(4)予以核對，但對某些材料，如混凝土、鑄鐵、金屬等等，在進行簡單伸引試驗時，已確定了情況(4)的摩爾圓。圖1-6所示為混凝土和鋼的摩爾圖。圖1-6每一情況在坐標原點右側的摩爾圓代表材料的抗壓強度，而在左側者為抗張強度的情況。在圖1-6(B)中，示有一摩爾圓，該圓相應於在一直接剪切試驗中當法向應力為零時鋼的抗剪強度。因之，圖1-6(B)的摩爾圓(1)從鋼的抗壓強度，摩爾圓(2)從抗剪強度和摩爾圓(3)從抗張強度导出。

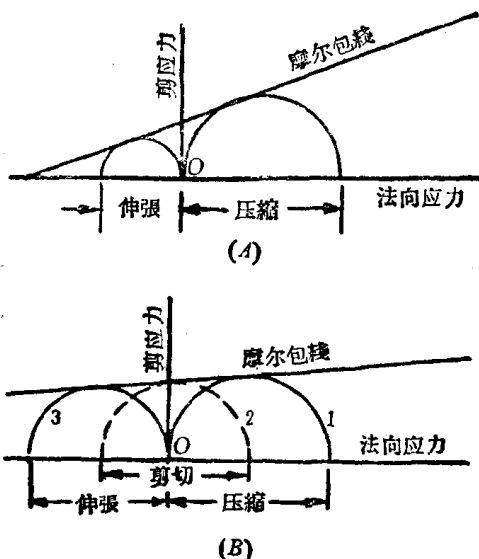


图1-6 混凝土和钢的摩尔图

如图1-5(B)、(D)、(F)和(H)所示，摩尔包线所截纵轴上的一段，称为粘聚力 C ，而摩尔包线与水平轴间的角为内摩擦角 φ 。图1-5(B)、(D)、(F)和(H)中的摩尔图和摩尔包线，和图1-3(C)、(F)、(I)和(J)中的库伦图和库伦包线之间，相似性是十分明显的。

库伦包线和摩尔包线的比较

图1-7表示从直接剪切试验和三轴试验获得真实数据的情况。对于情况(1)的直接剪切试验，试样承受一不变的法向应力 n ，而剪应力 S_s 系逐级地施加或为一逐渐增加的荷载，直到剪切破坏产生时，达到在该法向应力时的材料抗剪强度为止。这情况示如图1-7(C)中的垂直线。此垂直线与库伦包线的交点代表对于所施加的特定的法向应力 n ，所加的剪应力 S_s 。