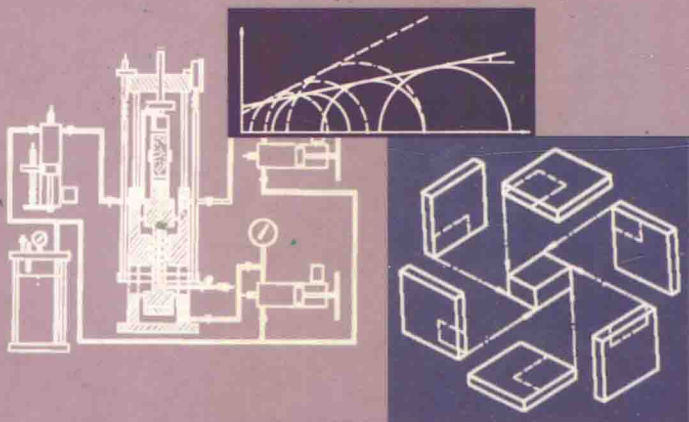




三轴试验

原理与应用技术

朱思哲 刘 虔 包承纲 郭熙灵 常亚屏 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



三轴试验原理与应用技术

朱思哲 刘 虔 包承纲 郭熙灵 常亚屏 编著

电力科技专著出版资金资助项目



中国电力出

www.cepp.c



本书的主要内容包括静三轴试验、特种三轴试验（扭剪试验、真三轴试验、平面应变试验）和动三轴试验。三轴试验是土力学上最重要的试验之一，是岩土工程工作者考察土的工程力学性状、寻求合理设计参数、从事理论研究所不可缺少的试验手段。编著者结合自己多年从事三轴试验的研究成果与经验，对三轴试验的原理、仪器性能、试验方法、资料整理、成果应用以及发展现状作了较系统和全面的介绍、分析和评述。该书是一本迄今为止较全面介绍三轴试验（静力试验和动力试验）的理论及试验方法的书籍。

本书供从事水利、交通、建筑、地质等部门及高等院校从事岩土工程的试验人员、设计人员、科研人员及教学人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

三轴试验原理与应用技术/朱思哲等编著. —北京：
中国电力出版社，2003

ISBN 7-5083-1450-6

I. 三... II. 朱... III. 土-三轴试验
IV. TU411.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2003）第 019865 号

中国电力出版社出版、发行

（北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>）

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2003 年 6 月第一版 2003 年 6 月北京第一次印刷

850 毫米 × 1168 毫米 32 开本 8.25 印张 217 千字

印数 0001—3000 册 定价 35.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

（本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换）

编著者简介

朱思哲 中国水利水电科学院教授级
高级工程师

刘 虔 中国兵器工业勘察设计研究
院高级工程师

包承纲 长江科学院教授级高级工程
师

郭熙灵 长江科学院教授级高级工程
师

常亚屏 中国水利水电科学院教授级
高级工程师

序

三轴试验是土工试验中一项重要的力学试验。自 1934 年美国伦德里克 (Rendulic) 首先用这种方法测定土的强度参数以来,迄今已有 60 余年的历史。在这期间,有关试验的测试技术有了很大发展。试样直径由 38mm 增大到 1000mm,侧压力由 400kPa 增大至 7000kPa,由静力试验扩展至动力试验。因此,三轴试验现已成为测定土的静力特性、动力特性和研究砂土液化的主要试验方法,是研究土本构关系的主要手段。用三轴试验测定的土的参数已成为重要岩土工程设计的主要依据。国内外的土工试验规程均把三轴试验列为主要试验项目。但迄今为止,有关三轴试验的系统专著较少。

本书的编著者都多年从事岩土工程试验研究,具有扎实的理论基础和丰富的实践经验,他们结合自己的工作经验和研究成果,编写了这本书。该书对静三轴试验、特种三轴试验(空心扭转三轴试验、真三轴试验、平面应变试验)和动三轴试验的试验原理、试验方法、仪器设备、试验技术及成果应用等作了系统的介绍,内容丰富,可供从事岩土工程的工作者参考应用。

中国科学院资深院士:

江同韶

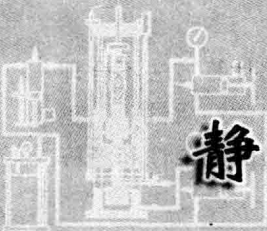
2001 年 1 月

目 录

序

第一章 静力三轴试验	1
第一节 概述	1
第二节 强度概念与三轴试验的发展	2
第三节 三轴试验原理	6
第四节 土体应力平衡条件	12
第五节 总应力与有效应力	20
第六节 静三轴试验的仪器设备.....	27
第七节 三轴试验的类别	54
第八节 有关试验的一些技术问题	86
第九节 资料整理与破坏标准的确定	106
第十节 多级三轴试验	126
第十一节 三轴试验的优缺点及成果应用	134
第二章 特种三轴试验	143
第一节 概述	143
第二节 空心扭剪三轴试验	144
第三节 真三轴试验	160
第四节 平面应变试验	167

第五节	各种应力状态和应力路径试验	173
第六节	典型试验实例	183
第三章	动三轴试验	189
第一节	概述	189
第二节	振动三轴仪的类型	190
第三节	动三轴试样的受力状态	206
第四节	动三轴试验仪的测试系统	217
第五节	动强度和液化试验	230
第六节	动变形特性试验及成果整理	240
第七节	试验成果的应用	247
参考文献		252



静力三轴试验



第一节 概 述

岩土工程中有关土工问题可分为两大类，即变形问题和稳定问题。变形问题是研究土体由于其自身重量的作用，或外加荷载的作用，而产生变形的問題；稳定问题是研究土体受到外力作用或自身重量的作用而产生破坏的问题。

自然形成的山坡、海岸、河岸和人工构筑的坝坡、路堤等之所以能保持一定的坡度或直立状态，是因为土体本身具有一定的强度。水是没有强度的物质，因此它不能形成坡度，更不能保持直立状态。各种土工构筑物的坡度或直立的高度则有一定的限度，这种限度是由其本身的强度所决定的，如超过其强度就会发生滑动或坍塌。挡土墙坍塌，房屋因地基破坏而倾倒等事故，就是土体内部由于外加荷载所产生的剪应力超过了土的抗剪强度所致。因此在工程勘察设计中，土的强度参数，是计算和研究土体稳定性、地基承载力和土压力等的重要指标。

土是由固体颗粒、水 and 气三相或由固体颗粒和水或固体颗粒和气二相所组成的，它的力学性质比一般金属材料或其他非金属材料的力学性质要复杂得多。其力学性质不仅与地质条件有关，而且与它的含水率、颗粒级配、矿物成分、密度等有密切关系。因此有经验的工程师，在测试土的强度参数时，不仅要考虑工程设计要求，更要考虑土的性质、施工条件及运用条件等因素，然后才选定用什么试验方法和仪器测定土的强度参数和变形参数，以使其试验结果能符合工程的实际情况。一个工程在勘察设计

时, 采用的强度参数不适当所引起的误差, 要比计算方法不合理所引起的误差大得多。因此, 科学地进行土的力学性质试验, 正确地确定土的强度和变形参数, 是保证土构筑物的安全性和经济性的重要条件。



第二节 强度概念与三轴试验的发展

一、强度的基本概念

土的抗剪强度是土体抵抗剪切破坏的能力。如果在土体上施加一定的外力, 则土体产生变形。由于作用力的方向不同, 产生的变形也不同, 有压缩变形、拉伸变形及剪切变形。在剪切变形中, 若施加的外力超过了土的抗剪强度, 土体便会沿某一结合面滑动, 而产生剪切破坏。图 1-1 所示为上述各种破坏变形的形式。

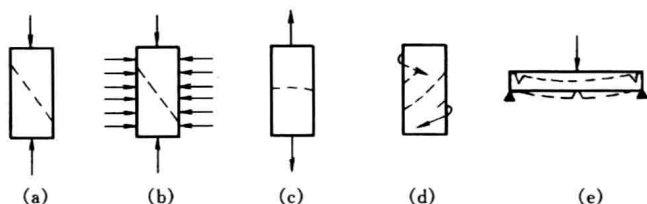


图 1-1 土体的各种破坏变形

- (a) 无侧限压缩破坏; (b) 有侧限压缩破坏;
(c) 拉伸破坏; (d) 扭转破坏; (e) 弯曲破坏

土体的破坏大多为图 1-1 (a) 和 (b) 所示的两种破坏形式, 主要为压缩破坏, 有时也会产生局部拉伸破坏, 如坝顶两端产生张裂缝等。

下面以图 1-2 所示情况为例简单地说明抗剪切强度的基本概念。

将一重 W 的块体放在一不光滑的桌面上, 这时桌面对块体

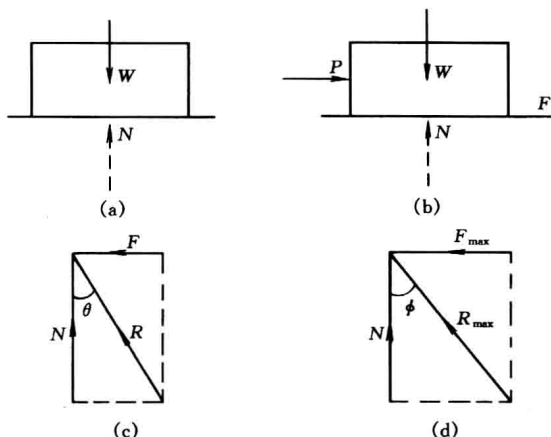


图 1-2 摩擦与摩擦角

产生反作用力 N ，它与 W 方向相反且大小相等，如图 1-2 (a) 所示。若对块体施加一不使块体移动的水平力 P ，这时块体与桌面接触面上产生一与 P 大小相等方向相反的力 F ，它是由桌面与块体接触面的摩擦而产生的，即摩擦力，如图 1-2 (b) 所示。 N 与 F 的合力为 R ， R 与 N 的夹角为 θ ，如图 1-2 (c) 所示。 P 增大，摩擦力 F 也随之增大，当达到一定极限值 $F_{\max}$ 时，块体开始移动。因为 N 为常数，故 R 与 θ 值相应增大。 $F = F_{\max}$ 时的 $\theta = \phi$ ， ϕ 为摩擦角。 $F_{\max}/N$ 称为摩擦系数，即

$$\tan \phi = \frac{F_{\max}}{N}$$

抗剪强度表示为：

$$\tau_f = \sigma \tan \phi \quad (1-1)$$

式中 $\tau_f = \frac{F_{\max}}{A}$ ——抗剪强度（最大剪应力）；

$\sigma = \frac{N}{A}$ ——法向应力；

A ——块体的接触面积。

对于无黏性土来讲，式 (1-1) 表达了土颗粒间摩擦力的概

念。对于黏性土来讲,除摩擦力外,还有颗粒间由于水膜或胶结物所产生的黏聚力 c ,其抗剪强度可以表示为:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (1-2)$$

式(1-2)是库仑(Coulomb)于1773年首先提出的,它是土力学中三大定律之一的库仑定律,其他两个定律为固结理论和达西(Darcy)定律。

土的抗剪强度试验的任务是测定土的强度参数 c 值和 ϕ 值,以便根据不同的法向应力 σ 求得相应的抗剪强度 τ 。现将目前各国常用的测定土的强度的主要方法列于表1-1。

表 1-1 室内抗剪强度试验方法

试验方法	测定的参数	说 明
三轴试验		
CD 试验(固结排水剪)	ϕ_d, c_d	最可靠的有效应力法
CU 试验(固结不排水剪)	ϕ, c, ϕ', c', S_u	强度高于实际值,因超固结,含水率较低
UU 试验(不固结不排水剪)	S_u, ϕ_u, c_u	在不压缩的情况下,室内测定的强度值
平面应变试验	ϕ, c	结果略高于静三轴试验值几度(松砂除外),比较符合挡土结构的实际情况
直剪试验(慢剪)	ϕ', c, ϕ'_r	适用于试样破坏面与现场破坏面相同方向的土。其值低于三轴试验值,但高于三轴拉伸试验值,最适用于测定残余强度参数 ϕ'_r
单剪试验	S_u, ϕ', c'	水平面为最大剪应变破坏面
无侧限抗压强度试验	$S_u = \frac{1}{2} q_u$	强度一般低于实际强度
十字板试验(F)	S_u, S_r	剪应力施加于垂直面上
扭剪试验(F)	S_u, S_r	剪应力产生在垂直于转动轴的平面上
袖珍贯入计试验(F)		破坏值近似液性指数,适用于现场按液性指数分类
CBR 试验(F)		用于路面设计,可用 U_c 指粗略估算强度试验值

注 表中(F)表示此方法也可用于现场试验。 c 、 ϕ 为总应力参数, c' 、 ϕ' 为有效应力参数, S_u 为总强度值, ϕ'_r 为残余强度值, S_r 为灵敏度, q_u 为无侧限抗压强度。

表中所列的几种试验方法,使用最广泛的是直剪试验和三轴试验。直剪试验的仪器和试验方法均较简单方便,但存在一些缺点和局限性,例如不能控制排水条件和测土中孔隙水压力等,因此已逐渐为三轴试验所取代。直剪试验仅限于作慢剪试验和进行残余强度的测定。

二、三轴试验的发展与现状

早在 1933 年,德国的沙菲尔特 (Seffert) 曾在普鲁士水道试验站用三轴仪研究土的固结,其目的是为了减少试样的侧壁摩擦。1934 年美国的斯坦通 (Stanton) 用三轴仪作沥青试验。到了 1936 年美国的伦德理克 (Rendulic) 正式开始用三轴仪测定土的强度参数。40 年代美国有些研究机构研制了各种不同形式的三轴仪,但当时对施加轴向压力,都采用直接加荷方式,即应力控制式。1943 年以后,才开始用量力环测轴向力,用机械传动使试样产生等速轴向变形,即应变控制式。60 年代英国的毕肖普 (Bishop) 和亨开尔 (Henkel) 发表了关于三轴试验的专著,对三轴试验方法、仪器设备等作了系统介绍,为推动和完善三轴试验作出了贡献。

我国于 20 世纪 50 年代开始研制三轴仪。1953 年原南京水工仪表厂,即现在的南京电力自动化设备厂首先制造了用磅称施加轴向力的三轴仪。1957 年又仿制了应变式三轴仪。60 年代又参照国外的经验和标准,研制了用齿轮变速控制轴向变形的三轴仪。这时国内各科研、勘察和设计单位逐渐购置三轴仪,三轴试验逐渐开展起来。当时的试样直径为 38mm、76mm、100mm 三种。周围压力只能达到 600kPa。1970 年研制了高压大型三轴仪,试样直径为 $D = 300\text{mm}$,周围压力达到 1.5MPa。1985 年由中国水利水电科学研究院组织 3 家工厂共同研制了周围压力达到 7MPa 的大型三轴仪,并配有自动采集数据装置。

我国三轴试验的发展是与三轴仪的研制发展同步进行的。我国三轴仪的发展经历了从仿制到自行设计和制造的过程,目前已

可批量生产大、中、小型三轴仪系列产品，并采用先进的计算机技术，自动采集数据和处理数据。最近已研制出按设定的程序全自动操作的三轴仪。三轴仪的批量生产，对我国三轴试验的普及和发展起了推动作用。目前三轴试验已列入我国各行业的土工试验规程及国家标准《土工试验方法标准》。

近二十多年来，无论是在仪器设备方面，还是在试验技术与试验方法方面，三轴试验都是土工试验中技术发展最快的一种试验。试样的直径为 35 ~ 1100mm，周围压力为 600kPa ~ 10MPa，可以说试样从小到大、压力从低到高，可以满足各种工程的要求，适用于各种土类的试验。三轴试验除了用于测定强度参数 c 和 ϕ 外，还用于土体孔隙压力消散试验、渗透试验和静止侧压力系数试验等。

第三节 三轴试验原理



一、主应力

根据力学原理，假定一土体保持平衡状态，则其中某一点必有三种作用于互相垂直面上的应力。如从土体中切出一小立方体，如图 1-3 所示。图中平行于 X 、 Y 、 Z 三个方向的力，分别称为大主应力 σ_1 、中主应力 σ_2 、小主应力 σ_3 。与三个主应力垂直的作用面分别称为大主应力面、中主应力面和小主应力面。三个主应力值的大小为 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ，且互相垂直，主应力面上只有

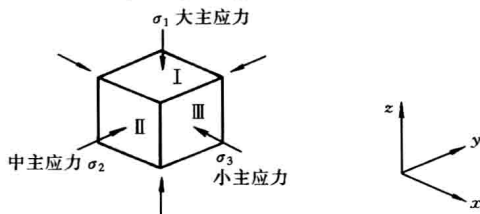


图 1-3 主应力与主应力面

法向应力，无剪应力。这种应力状态，可以在室内用一个立方体试样进行模拟。如图 1-4 所示，利用六块可以互相移动的刚性板，分别施加 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 力于试样，使之达到破坏，并测定试样三个方向的变形和体积变化，这种试验称为真三轴试验。

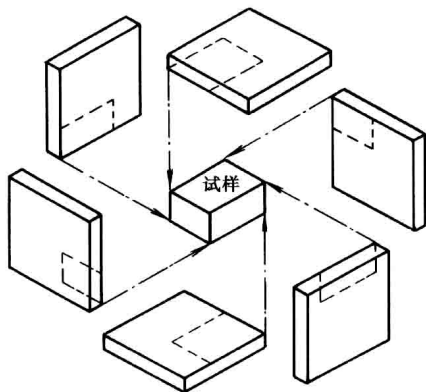


图 1-4 刚性板结构的真三轴仪示意图

真三轴试验所施加的应力和所测得的强度参数以及变形参数能较真实地反映实际情况。然而这种试验的仪器构造复杂、操作麻烦。目前除了作研究用外，还未被岩土工程师用于实际的工程勘察设计。

许多土工问题如土坡、路堤、挡土墙、码头等均属于平面问题，在设计上作为平面应变状态处理，即只考虑 σ_1 和 σ_3 。在一些特殊情况下，如油罐基础，常按轴对称问题处理，即 $\sigma_2 = \sigma_3$ 。三轴试验就是使试样在轴对称的应力状态下进行试验。由于三轴试验比真三轴试验简单方便，因此得到了广泛应用。

二、三轴试验的应力分析

三轴试验采用圆柱形试样，试验时在侧向小主应力 σ_3 保持恒定的情况下，逐渐增大轴向大主应力 σ_1 ，直至试样达到破坏。因为试样是圆柱体，故 $\sigma_2 = \sigma_3$ ，因而为轴对称应力状态。如图 1-5(a)所示。

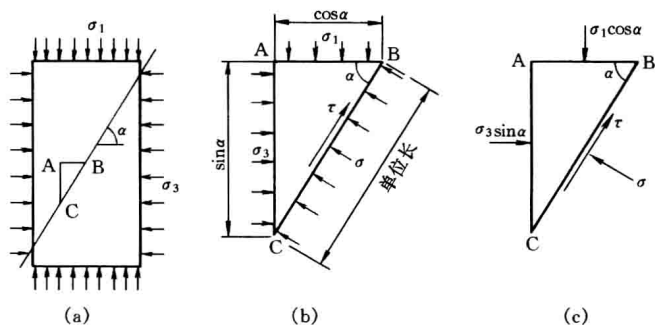


图 1-5 三轴试样的应力状态

如沿圆柱体轴线取一个垂直面 [图 1-5 (a)] 作应力分析, 取其中任一与大主应力面成 α 角的斜面上的一个小三角形 ABC, 设 BC 之长为一个单位。此三角形 ABC 所受的应力如图 1-5 (b) 所示。各面上所受的应力可分别表示如下:

	法向应力	剪应力
AB 面	σ_1	0
AC 面	σ_3	0
BC 面	σ	τ

作用在 ABC 三个面上的总力 [见图 1-5 (c)] 为:

	法向应力	切向力
AB 面	$\sigma_1 \cos \alpha$	0
AC 面	$\sigma_3 \sin \alpha$	0
BC 面	σ	τ

根据力的平衡条件, 作用在 ABC 上的力, 沿 σ 方向和 τ 方向分别为:

$$\sigma - \sigma_1 \cos^2 \alpha - \sigma_3 \sin^2 \alpha = 0$$

$$\tau + \sigma_3 \sin \alpha \cos \alpha - \sigma_1 \sin \alpha \cos \alpha = 0$$

即

$$\sigma = \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_3 \sin^2 \alpha$$

$$= \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\alpha$$

(1-3)

$$\tau = (\sigma_1 - \sigma_3) \cos \alpha \sin \alpha = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\alpha \quad (1-4)$$

式 (1-3) 和式 (1-4) 表明, 当圆柱体受到大主应力 σ_1 和小主应力 σ_3 时, 其中任一斜面上受有法向应力 σ 和切向应力 τ 。若以 τ 为纵轴, σ 为横轴, 在横轴上以 σ_1 和 σ_3 为定点, 根据式 (1-3) 和式 (1-4), 以 α 为变动值, 则诸点的轨迹为一圆, 圆心在横轴上的 $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$

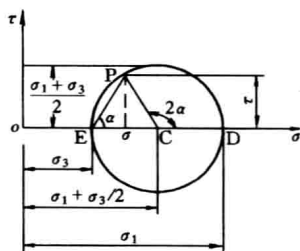


图 1-6 摩尔应力圆

处。圆的截点为 σ_1 和 σ_3 。圆周上任意点的坐标表示在某一斜面上的法向力 σ 及切向力 τ , 见图 1-6, 该圆称为摩尔圆。从图上可知圆的直径为 $\sigma_1 - \sigma_3$, 即主应力差; 最大剪应力为 $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$, 即圆的半径, 圆心 c 在 σ 轴上的 $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 处。

三、摩尔圆的性质

如果试样上的大主应力面和小主应力面的方向为已知, 可以从摩尔圆上确定试样内任一斜面的剪应力 τ 和法向力 σ 。以图 1-7 为例, 图的右边为一、三轴试样, 左边为相应的摩尔应力圆。经圆的 D 点 (σ_1) 作一线平行于试样的大主应力面 AB, 经过 E 点 (σ_3) 作一线平行于小主应力面 AC, 则两线必然交于圆周上 O_p 点。两线相交成直角。然后经 O_p 点作与 $O_p D$ 线成 α 角的线交圆周于 P 点, 则 P 点的横、纵坐标值就是试样斜面 (倾角 α) 的法

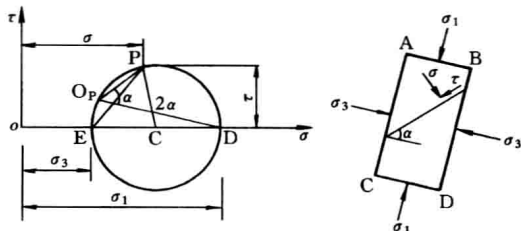


图 1-7 摩尔圆与试样斜面上的应力

向应力 σ 和切向应力 τ , O_pP 线的方向就是试样内斜面的方向。同样, 过 O_p 点作任意角 α 与圆周相交, 则该交点的坐标值为试样内与 O_pP 成 α 角的斜面上的法向应力 σ 和切向应力 τ 。 O_p 点称为极点。确定了 O_p 点, 通过它可以找出任一斜面上的法向应力 σ 和剪应力 τ 。

上述 P 点的坐标值代表斜面上的应力, 可以从图 1-7 予以证明。图上 P 点的纵坐标值为 τ , CD 为圆的半径 R , $\angle PO_pD = \alpha$, 为圆周角, 故 $\angle PCD = 2\alpha$, 因而:

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha$$

$$\sigma = \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right) + \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right) \cos 2\alpha$$

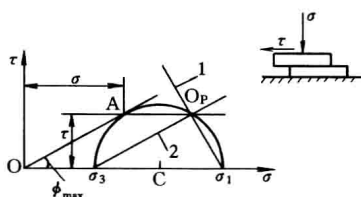


图 1-8 直剪试验的主应力及主应力面

1—大主应力; 2—小主应力

此两式与式 (1-3) 和式 (1-4) 完全相同。故 P 点的坐标值即代表斜面上的应力。

根据同样的道理, 若大主应力面水平, 小主应力面垂直, P 点代表破坏应力 (σ 和 τ), 则 EP 方向就是破坏面方向, ED 方向就是大主应力方向, E 点相当于 O_p 的极点。对于直剪试验, 当达到

破坏状态, 剪应力 τ 及法向应力 σ 为已知, 则可以作出相应的摩尔圆。如图 1-8 所示, A 点表示在直剪试验中已测得的试样破坏强度点。通过 A 点的强度包络线 OA, 可绘出与 A 点相切的摩尔圆。其作法是, 作垂直于 OA 的直线交 σ 轴于 C 点, 以 C 为圆心, 作切于 A 点的摩尔圆。因为直剪试验的剪切面为水平方向, 故过 A 点作平行于 σ 轴的平行线交圆周于 O_p 点, 联 $O_p\sigma_1$ 和 $O_p\sigma_3$, 二者分别表示为大主应力面和小主应力面方向。因而在直剪试验中, 相应的主应力面方向和大主应力 σ_1 及小主应力 σ_3 均可确定。