

粘性土抗剪强度译文集

科学出版社

粘性土抗剪强度译文集

水利水电科学研究院
南京水利科学研究所 选译

江苏工业学院图书馆
藏书章

科学出版社

1965

內 容 簡 介

粘性土抗剪强度是决定土体稳定性(如土坝坝坡的稳定性、地基承载力和土压力)的基本因素,但是在以往,人們在这方面的認識还十分肤淺,所以往往造成有关工程的浪費或失事。近十几年来,通过各国学者的致力研究,人們对抗剪强度的实质、測定方法和应用法則等方面的認識有了較大的进展。本譯文集集中的九篇論文不但总結了到1960年为止的已有的比較成熟的观点和实用方法,还提出今后的研究方向,对国内的土工研究和設計人員很有参考价值。

粘性土抗剪强度译文集

水利水电科学研究院 选译
南京水利科学研究所

*

科学出版社出版

北京朝阳門内大街117号

北京市书刊出版业营业許可証出字第061号

上海市印刷五厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

*

1965年10月第一版

开本:850×1168 1/32

1965年10月第一次印刷

印张:18 5/8

印数:0001—2100

字数:496,000

統一书号:15031·201

本社书号:3287·15—1

定价:[科七] 3.10元

譯 者 的 話

土的抗剪强度是决定土体稳定性的最基本的因素，但长期以来，土的抗剪强度，特别是粘性土的抗剪强度的实质一直没有得到很好了解。近十几年来，通过各国学者的致力研究，人們对抗剪强度的实质、測定方法和应用法則等方面的認識都有較大的进展，初步建立起一套以太沙基所提出的有效应力原理为基础的試驗和設計方法，并已在許多工程中应用而获得成功，相应地，測定强度的仪器和試驗技术也都有了改进。但是，这套方法仍是不够完善的，其中有許多問題还有待深入研究和改进。

这本譯文集是“粘性土抗剪强度研究会會議論文集”的选譯本¹⁾。會議論文的内容涉及下述六方面：1. 关于抗剪强度和破坏准則方面的假說和概念；2. 試驗設備、技术和誤差；3. 以往研究資料的总結和評价；4. 最近的研究成果；5. 現場观测和特殊粘性土的性质；6. 抗剪强度資料在实际工程中的应用。在这本譯文集中，我們着重选譯了一些較为全面而且实用的論文，介紹国外近来已經掌握的一套以有效应力原理为基础的实用方法和成功經驗。例如：粘性土的抗剪强度一文系統地介紹了美国垦务局 30 年来摸索出来的一套确定粘性土强度的方法和应用經驗，对水利工程人員很有帮助；三軸試驗与解决稳定問題的关系一文报导了三軸試驗成果的应用实例，証明所采用的方法是比較能反映实际情况的；压实粘性土的强度一文細致地分析了压实土的强度和变形特性，是道路和水利工程人員普遍感兴趣的；飽和粘土抗剪强度的物理分量和关于粘土抗剪强度的一些見解和試驗数据两篇文章，都是

¹⁾ American Society of Civil Engineers, Soil Mechanics and Foundations Division, Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soil, 1960.

較為全面的總結報告,值得每一土力學工作者閱讀。另外,還選譯了幾篇專門性的論著,以使讀者了解抗剪強度研究的動向,比如決定非飽和粘性土強度的因素一文提出了進一步研究非飽和土的抗剪強度的方向;飽和重塑粘土的抗剪強度一文討論了飽和粘土特有的強度性質;正常固結粘土抗剪強度特性的比較研究一文介紹了諸常用試驗方法之間的差別。論文集中各分組的分組總結報告也全部譯出,供讀者了解各方面不同的意見。

本書由水利水電科學研究院卞富宗、方濂華、朱思哲、陳愈炯、俞培基、張文正、蔣彭年、蔣國澄以及南京水利科學研究所盛崇文、魏汝龍等翻譯並相互校對,最後由蔣國澄統校。

目 录

粘性土的抗剪强度	(1)
饱和粘土抗剪强度的物理分量	(153)
三軸試驗与解决稳定問題的关系	(275)
决定非饱和粘性土强度的因素	(346)
饱和重塑粘土的抗剪强度	(377)
关于粘土抗剪强度的一些見解和試驗数据	(401)
正常固結粘土抗剪强度特性的比較研究	(438)
压实粘性土的强度	(457)
各分組召集人的分組报告	(555)

粘性土的抗剪强度

H. J. 吉勃斯¹⁾ 等

I. 引 言

A. 一些想法和仪器设备的发展

欲对垦务局在土的抗剪强度方面的实践作一评价，先检查一下这些实践的历史发展还是值得的。垦务局的主要任务是对水利资源设施从事系统的调查研究、设计和施工，而不是进行基本的科学研究。因而所写的报告主要是陈述一些理由，以阐明什么调查研究是需要的和正确的，而不是一份从中取得基本资料的原始文件。所以我们无法把垦务局工程师们所提出的一些想法和他们由别处引用来的意见加以区分。

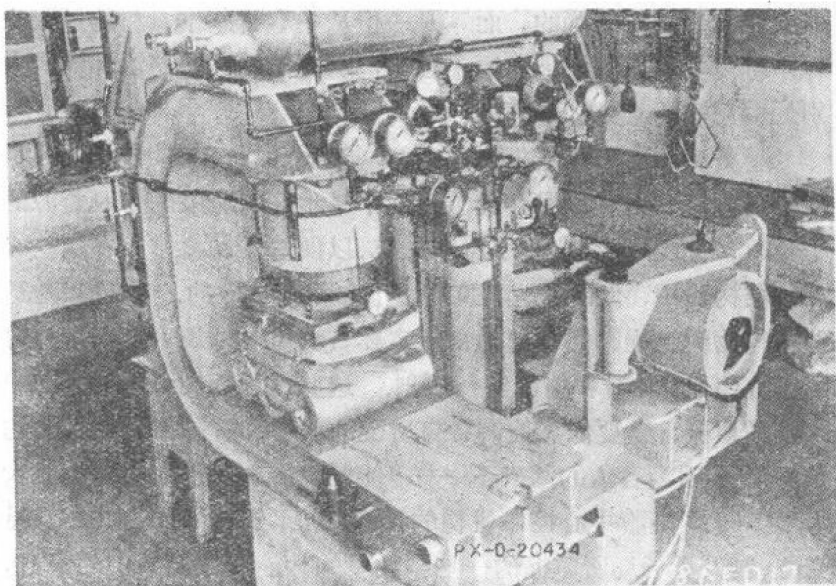
垦务局是作为开垦机构在 1902 年创立的。1923 年才采用目前的名称。在担负起保存美国西部干旱地区的有限的水利资源的职责时，它立即着手兴建水库和渠道，以便蓄水和输水。在这些必要的结构物中，有许多是建筑在土上和用土造成的。主持兴建这些结构物的工程师们，起初被指定要负责对一个规划的所有部分的调查研究、设计和施工进行规划。这些工程师们只有极小的中心指导组织，主要依靠他们各自所受的教育和经验来建造他们的结构物。因为各人的基础不一样，他们设计和建造的结构物就大大地不同。随着中心控制机构的逐渐发展，工程师们之间的意见交流，以及垦务局所掌握的一些结构物的性能观测记录中的资料，

¹⁾ 美国内务部垦务局土工试验室专门研究室主任，科罗拉多州，丹佛市。

所有这些条件组合起来,形成目前的土工实践。

1. 垦务局土工试验室的建立和抗剪强度的一些初步概念 土工问题的专门化,是从1933年开始的。在这个时间以前,土工问题是根据把土的描述与挖方和填方的稳定边坡相联系起来的一些经验规律来解决的。不适合这些经验规律的土,在填方的施工中避免使用,并从地基中挖除。在挖方的边坡中遇到这类土时,采取经常性的维护工作被认为是一个可行的解决办法。遇到下述情况时,才希望对土作些试验,例如,根据某一经验记录,对将要使用的土,在解决方法中提供一些改善,以及对以往舍弃不用的土提供处理办法。

在组织土工试验室的时候,曾对工程文献作了一次广泛的探索,以确定那些试验应当做和怎样做这些试验。基本文献包括太沙基^[32];普洛克特^[26];以及第一届高坝会议文集^[16]。为了确定土的抗剪强度,制作了一种直接剪力仪处理钻孔岩心的圆柱试样,以进行地基原状土的试验。稍后又制造了另一种直接剪力仪处理一呎见方,1/2到8吋厚的试件,图I-1。在设计这种仪器时,尽了各



图I-1. 直接剪力仪

种努力把仪器中的应变、应力和摩擦力减少到可以略去不計。当这种仪器正在制造时，就根据一些坝的规划，搜集了大量的土样；按照当时能够定下来的最好的步骤，开始了这些土样的常规試驗。与此同时，垦务局的工程师們把注意力集中在怎样拟定一些方法，来分析堤坝的适宜性。对结构物的观测仪器設備也开始了研究，以便能测得结构物的运用情况。

关于土的性状的理論上的发展，土工試驗方法和試驗仪器，設計方面的实践，以及对堤坝性能的测量等都同时在进行。但是这些工作的发展速度，在很大程度上为所遇到的情况的类型，以及修正以往业已建立的一些方法的必要性或实用性所控制。何况一个理論从开始孕育起直到通过实际观测資料加以証明，需經過一段較长的时期。这种情况对土力学特別突出。这說明为什么在关于土的性状的一般理論中仍存在有爭論的地方，为什么在理論性概念、試驗方法和实际应用之間尚有差別。

建立試驗室的理由之一，是逐漸認識到土的抗剪强度不能由休止角确定。希望建立試驗室的另一个因素是由于这样一个理論，就是非饱和土和饱和土的抗剪强度有很大的差別，然而，在靜水以上和以下的边坡並沒有任何不同。庫倫方程

$$s = c + \sigma \tan \phi \quad (I-1)$$

式中 s = 抗剪强度；

c = 凝聚强度；

σ = 剪切面上的法向应力；

$\tan \phi$ = 摩擦系数，

被认为能适当地确定土的强度，但是关于土的强度由于饱和作用而降低的这一机理还是不清楚的。有一种意見认为水起了潤滑作用。另外一种意見則估計土在饱和前如果能达到足够的紧密度，那么饱和时所丧失的强度是可以忽略不計的。当时所能看到的文献，对这些問題的解釋是頗为含糊的，因而考虑到必需通过試驗室試驗和現場观测来解决这些問題。

垦务局所采取的途徑，在某些方面与在大学里的工程师們所

遵循的有所不同。例如，垦务局首先研究的是根据經驗表明适宜于做堤坝建筑物的那些土类。所研究的土是重新制备的而不是就地的土，而且最注意的是非饱和状态的而不是饱和状态的。这些概念上的差别常常阻碍了与工程师們交流一些意見，因为他們的經驗都是关于饱和原状土的。

在进一步了解土的性态时，首先遇到的困难是实际结构物的性能究竟如何。在量测性能方面的第一件工作是要确定浸潤綫的位置，即靜水压力等于零的那条綫的位置。当在堤坝內設置观测井以确定浸潤綫时，发现在某些情况中，深井的水位稍高于浅井的水位，而在另外一些情形下，这种差别恰又相反。当时对这种性态找不到合理的解釋，于是就归罪于仪器的性能有缺点。曾作了各种改进来保証仪器的埋設不致妨害结构物性能。当采用了无流式压力盒但仍旧測得了不正常的性能后，就进一步考虑去寻求一个理論上的解釋。

与此同时，在試驗室內发现了一些意料不到的性状。例如，在粘性土的常規性試驗中出現曲綫形的破坏包綫，而不是象庫倫方程所預期的直綫。在試圖闡明这种性状时，发现試驗速率、試驗前預先固結荷重作用時間的长短，以及試样的厚度等都影响包綫的曲率。为了确定最适宜的堤坝填筑含水量以获得最大强度而布置的另外一套試驗表明，凝聚力随含水量有显著的改变，但是摩擦系数却并不如此。在这套試驗里，发现非常干的土（即在試样容器中放置干土）的破坏包綫是直綫，犹如非粘性土的一样。

2. 对孔隙压力概念的認識 根据这些不同性状看来，显然，原来对影响土强度的一些因素的設想已感不足，需要发展一个更全面的知識。在1936年春的一系列會議中提出了这样的意見，就是当土固結时在孔隙中产生的一种压力，或許对观测到的某些性状有关系。在这些會議里还提出了一些其他不同的因素来考虑。1936年7月10日作了測定內压力的首次試驗。1937年7月23日提出第一篇报告，对內压力提出一个假說，并闡述內压力对土的稳定的影响。接着于1938年10月24日对內压力的研究提

出一篇专门报告，陈述测量这些内压力的一些困难和量测方法上的发展。

起初这些内压力或“孔隙压力”纯粹被看做是一种试验室试验的现象。因此，假若能消除它们对试验室试验的影响，那么试验结果就能直接用到为设计而进行的稳定分析中。针对在实践中碰到的极端情况，制备了一种代表性的土样，并做了完备的试验。这种土样由25%的粉土粒和75%的粘土颗粒组成，流性限度是49%，塑性指数为22%，填筑含水量为28%，干容重为92.5磅/立方呎。这些试验表明，当预先固结时间超过30分钟后，1吋厚的直接剪切试件所表现的强度很少有变化。但是，除非在这样预压以后用慢的应变速率剪切，否则要得到不规律的结果。只有当固结和剪切时间加在一起超过6个小时或更多的时间，所确定的抗剪强度才是一致的。这一套试验结果发表于1938年12月13日。

对试验结果做进一步研究后发现，如果能把孔隙压力的影响完全消除，粘土的抗剪强度差不多和砂土的一样，而且做为一种强度来源的凝聚力可能就没有了。尽管这种假设并不是非常严密的，它却促使垦务局集中力量去寻求一种途径以确定孔隙压力和控制其发展。为评价在堤坝中的可资利用的强度而提出的各种理论，也被考虑如何正式确定下来。这些实验的结果由汗弥尔登^[14]提出了报告。

当对上面所提到的在确定一种试验方法中所碰到的困难正在进行探索时，已开始有了实际坝体中借静水压力指示器所测得的成果。奇怪的是在一些结构物上的试验表明，虽然堤坝的填筑材料具有低渗透性，而通过堤坝的渗流水却移动得很快。在另外一些坝中，土的渗透性较高，但流网的形成却又很慢。静水压力指示器是在坝完工后安装的，某些特殊影响也被认为是由于埋设仪器所产生的扰动所致。可是对扰动的机理仍不能确定，于是只好假定观测资料是合理的，来寻求一种解释。

按照正在发展的孔隙压力理论，认为施工期由于土体压缩而产生的孔隙压力，似乎是可能的。对较透水的土，在静水压力指示

器安装以前,这些压力能够排出。而对透水性小的土,则在設置仪器的时候仍留存一些压力。因为在試驗室里能产生很大的孔隙压力,所以在堤坝内也可能产生。为此訂出了計劃,在施工期要埋設靜水压力指示器。另外,也发现有必要确定施工期和施工完毕以后所产生的固結达到什么程度,并为此設計了仪器。

在埋設更多的靜水压力指示器以前,又有了进一步的想,就是采用一套简单的孔隙压力测头系統,将更有效和更經濟。对这种系統的优点缺点作了全面的研究,并决定对今后的仪器安装采用这种設計。

为了努力克服直接剪力試驗在量測孔隙压力时所存在的缺陷,于1939年采用了三軸試驗方法,于是以后的試驗,特別是試图对确定粘性土的抗剪强度作进一步的发展,都肯定用后一种仪器来进行。本文第 II 部分将要介紹这种仪器。

3. 关于有效应力概念的介紹 由于在不透水的土中观测到:如果孔隙压力不发生,强度有很大的增长。于是促使进一步探索消除孔隙压力的方法。另一方面来看,假設孔隙压力不能被消除,那么就要在稳定的分析中加以考虑。为此目的,对庫倫方程需要作一修正,使成为

$$\tau = c + (\sigma - u) \tan \phi \quad (\text{I-2})$$

式中的 u = 孔隙压力。应用这个方程时,对孔隙压力究竟如何产生的道理,需要更多的知識。最初尝试直接测量孔隙压力,但无效,于是希望探求一个間接的途徑,对这些結果提供論証。在認識到孔隙压力与土的压縮和固結有关之后,似乎提供了一个确定在任意荷重和任何時間下的孔隙压力大小的方法。

1940 年根据卡薩格蘭德提出的某些設計,制做了一些固結仪,用这种仪器可以測定土的時間-荷重压縮特性。因为在一些堤坝中已經安装了十字型固結管来测量堤坝中本身的压縮,这就易于把上述两种类型的测量加以比較。当时希望通过这种間接途徑,能够找到一个机理,把試驗室量得的孔隙压力和在地坝中产生的孔隙压力相联系起来。而在野外和試驗室所量得的压縮量二者

之間，則沒有找到直接的相关关系。

在这一点上发生了两件大事，对以后的发展有重要影响。第一，由于开始了第二次世界大战，使从事这些研究工作的许多人都分散了，以致有一段时间使工作进程趋于停顿。第二，在309呎高的綠山坝（Green Mountain Dam）中测得很高的孔隙压力，对该坝的安全感到担忧。与此同时，456呎高的安德逊侖奇坝（Anderson Ranch Dam）的计划也正在编制。虽然在試驗室内还没有找到能精确地测量孔隙压力的方法，但已經积累了足够的事实，并赋予孔隙压力概念以一种思想，这种思想对孔隙压力的存在和工作机理形成了一种信念。

如果在一个击实的土中存留的空气含量显著地超过土在荷载下能够发生的固結量，那么就能够避免由固結而产生的孔隙压力使稳定性降低的作用。这种效果同样可以通过增加击实作用并由此减少固結而很好的达到。可是为了降低土的渗透性，曾按照这个方向尽了很大的努力，并且感到这个途径已达到它的可能限度。

曾把拟議中的安德逊侖奇坝的土料，在不同的含水量下，做了一套固結試驗。根据含气量的改变，算出了可能形成的孔隙压力，发现可以画出一套曲綫，以代表不同外加应力下的孔隙压力，而这些曲綫差不多与普洛克特击实曲綫上的无空气孔隙的曲綫相平行。并且看到在远干于最优含水量下击实的土样，当固結完了后再湿润，将发生进一步固結；而湿于最优含水量下击实的土样则并不如此。这种“饱和崩潰”的現象表明了一个极限含水条件，填筑坝堤时是不希望低于該含水量的。幸好在这低限条件和一个高限条件（在高限含水量时，由于固結作用将产生高孔隙压力）之間，有一足够的含水量范围，使能填筑堤坝而不致遭到饱和崩潰或高孔隙压力。对这种特定土¹⁾，这一含水量范围在低荷重下相当大，但高荷重时却非常狹窄。这种試驗步驟叫做极限含水量控制試驗。

在大战期間，当試圖通过极限含水量的控制以掌握孔隙压力这一工作尚未获致結果时，又进一步尝试去寻找試驗室試驗結果

¹⁾ 指安德逊侖奇坝的土料。——譯者注

和野外性状之間的关系，不过这一工作是在时断时續的情况下进行的。曾經有这样一种認識，就是把野外材料中的粗顆粒舍去来进行試驗室試驗，可以得到使試驗数据与野外性状十分符合的結果，但是还不足以在試驗中发展这个信念。大战以后，希尔夫^[17]指出，如果把野外量測的总荷重固結曲綫用孔隙压力加以修正后，那么它們就几乎与試驗室的荷重-体积变化曲綫一样。这种有效应力原理早在 1936 年当解釋如何应用孔隙压力概念时就已經認識到，可是在研究大多数問題时，却忽视了它的重要性。

随着時間的推移，事情变得很明显，就是孔隙压力的发展能够通过試驗室試驗予以預測，而在野外則能够控制在某一範圍內。这种控制是借材料的選擇、含水量的控制、压实、加荷速率和設計等来完成的。于是根据有效应力所做的試驗，再結合特定的孔隙压力值，就能够用于安全系数的計算中。技术上的改进表明，在結構物中和在試驗室里都能量出孔隙压力，而且符合于理論值。但是当土的填筑含水量湿于普氏最优含水量时，随着含水量的少量变化，孔隙压力的改变是如此之大，以致不可能严格控制。如果必須采用在这个含水量範圍內的土料，則必須認識到这已接近于饱和条件。

4. 最近的发展 为进一步改进試驗室試驗，已經制造了一台大型三軸仪，以評定土中大顆粒的影响。在其它的改进中，还有使側向有效应力在試驗中为常数，并使試件在剪切前的孔隙比一样。这些步驟都是期望使試驗室的和野外的性状之間的关系更为一致，而且能对强度做較好的估計。由毛細管作用而产生的負孔隙压力的影响，根据以下指示也正在進行探索，即更好地說明凝聚力变化无常的原因。

根据有效应力原理而做的剪力試驗，以及逐漸累积起来的各種土的試驗成果，使有可能在直觀的描述或物理性指标和抗剪强度之間找到可靠的相关关系。这对目前为初步設計而評價土的一些方法，将能有所改进或加以增补。在時間許可时，这一方向也在研究。

已經发现土的孔隙压力易感性可以通过固結試驗确定，并且由此可确立填筑含水量的范围，这样就可以放心地采用很多土料。因而根据这些試驗选择土料，是一个可行的控制方法。当碰到飽和地基时，就采用地基排水、有选择的挖除，以及控制加荷速率等方法。相反，如果是干的、低密度的地基，則使地基浸湿，使荷重下的固結在施工期产生，这样在运用期就不致于由于渗透水而发生突然的土結構破坏。現正在研究一些方法，防止由于干燥裂縫而使强度丧失，以提供适当的設計和施工步骤。正在开展試驗室試驗，以便对裂縫的可能性提出一个較好的定量标准。

B. 文章的組織

本文中所用的名辞术語和符号，都是美国材料試驗学会和美国土木工程师学会共同提出的 ASTM D-653-58T 指示中所列出的。除非在文章中作另外特別叙述，参变数—凝聚力、凝聚强度，或 c ；内摩擦系数、摩擦力，或 $\tan \phi$ ；都是被用来分別表示有效应力摩尔包綫在零荷重下的截距和包綫的坡度。在非飽和土試驗中，这些参变数是通过不排水剪試驗并加以孔隙压力校正而获得的。在飽和土試驗中，使在四圍应力下排水，直至孔隙压力不再变化。然后将試样封閉并采用与非飽和土同样的方法进行試驗，除非作另外的規定。虽然根据有效应力整理摩尔强度包綫时，飽和土比非飽和土可能不同，但两者的参变数是没有区别的。

垦务局目前所用的仪器设备和試驗方法，在第 II 部分內予以介紹。該部分內也要討論試驗的精确度和适宜性。

文章的第 III 部分发展了孔隙压力概念，并解釋它对抗剪强度的影响，同时还闡述在試驗室和野外測量孔隙压力所采用的方法。

第 IV 和第 V 部分分別討論非飽和土和飽和土的抗剪强度。每一部分又再分为扰动土和原状土。

第 VI 部分介紹垦务局对具有特別性状特征的特殊土类的經驗。对这些土可以下这样的定义，就是它們的結構或化学組成，在結構物的工作年限內可能要改变，并引起强度特性的变化。过去

的謹慎的工程實踐都指出要盡量避免採用這些土，而且它們的性能在某些情況下仍不十分了解。

第 VII 部分敘述星務局應用十字板剪力試驗，就地測量土的強度的經驗。在儀器方面已做了很多改良，使能用在研究工作中而獲取良好的結果，並消除很多誤差的來源。

II. 試驗室三軸試驗設備和試驗方法

A. 儀器設備

1. 試驗儀器和試件的尺寸 星務局所用的剪力試驗設備和試驗方法，與美國其他很多土工試驗室的大不一樣。就如第 I 部分業已討論過的那樣，這種差別是過去 20 年來在剪力試驗的評價、資料的整理和設計的基本原則方面的發展的結果。在這個時期內，所進行的研究工作是探求超靜水壓力（孔隙壓力）對土的抗剪強度的影響，致力於闡明在直接剪力試驗中獲得的某些明顯的不規則的結果。

作為最初對孔隙壓力研究的一個結果，決定了利用三軸剪力試驗方法，這樣就能夠控制排水並量測孔隙壓力。在考慮了當時能夠辦得到的有關三軸儀的設備以後，設計了第一種星務局儀器，並在局的工場里制作出來。這儀器是用來試驗 $3\frac{1}{4}$ 吋直徑和 9 吋高的擊實土試件的。雖然第一種儀器已經改進了好幾次，但現在用的這種儀器和另外兩種儀器的基本設計，仍和原始的相同。現在採用的試件是另外幾種尺寸。所有被試驗的試件，其高度和直徑之比值為 2.25 或更大。

星務局土工試驗室所用的三軸儀可分為小型、中型和大型三種。繼工程師兵團試驗室（在加利福尼亞州蘇珊莉杜）的大三軸儀之後，在 1950 年就開始把大型儀器的一些特性予以定型化。星務局還有一些特有的三軸受壓室，其軸向荷重可以用壓力機或加荷杠杆來施加。圖 II-1, II-2 和 II-3 分別是小型、中型和大型儀器的照片和示意圖。

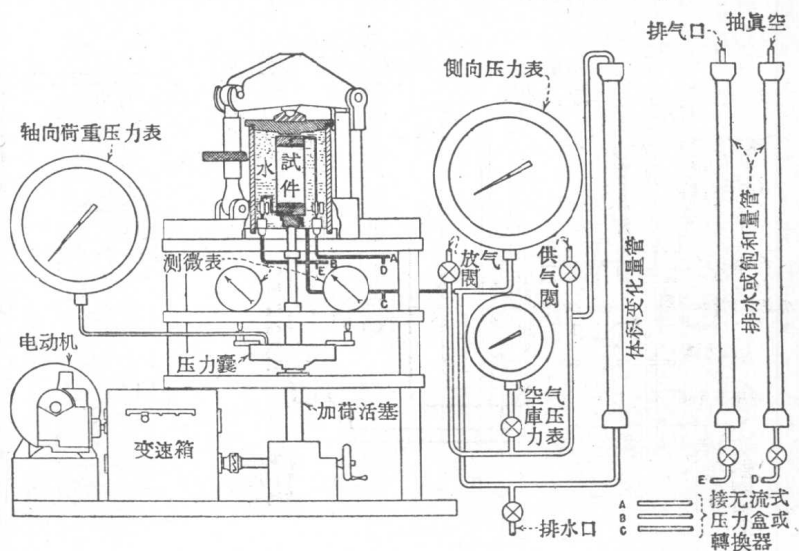
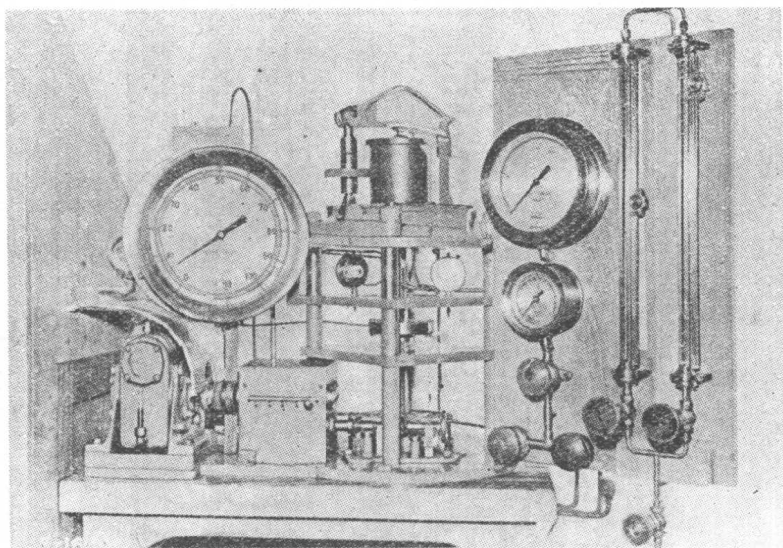


图 II-1. 小型三轴仪