

369115

成都工学院图书馆

基本馆藏

土壤性质的 三轴试验测定法

[英] A.W. 毕肖普 D.J. 亨开尔 著

陈 愈 炯 俞 培 基 译



81
98
土
学

中国工业出版社

土壤性质的 三轴试验测定法

〔英〕A.W.毕肖普 D.J.亨开尔 著

陈愈炯 俞培基 译



中国工业出版社

本书共有四章。在第一章中，作者結合土力学中經常碰到的实际問題，扼要論述了測定土的强度和变形所依据的原理。第二章着重說明三軸仪的特点，其中包括孔隙压力、体积变化和荷重量測定仪的特点。第三章介紹了标准試驗的試驗步驟，其中包括各种类型的三軸試驗步驟。第四章介紹了各种特殊試驗。此外，书末还有六个附录，分別介紹了仪器各个部件的校正方法以及最近几年来三軸試驗方面的新发展。

本书是敘述用三軸仪測定土的特性的一本較系統的著作，可供水利、建筑、交通、铁路等部門的土工試驗和設計人員使用，亦可供高等院校的有关师生参考。

本书系根据原著1962年第二版翻譯。第一到第四章系由陈愈炯同志翻譯，附录系由俞培基同志翻譯。

A. W. Bishop D. J. Henkel

THE MEASUREMENT OF SOIL PROPERTIES IN THE TRIAXIAL TEST

(1962, 2ed.)

EDWARD ARNOLD(PUBLISHERS) LTD

(LONDON · 1962)

土壤性质的三軸試驗測定法

陈愈炯 俞培基 譯

水利电力部办公厅图书編輯部編輯(北京阜外月坛南街)

中国工业出版社出版(北京佟麟阁路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 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ ·印张 $8 \frac{1}{4}$ ·字数185,000

1965年5月北京第一版·1965年5月北京第一次印刷

印数0001—2,960·定价(科六)1.20元

統一书号: 15165 · 3873(水电-505)

序 言

土力学应用于土木工程問題而取得成效，試驗室試驗是起着一定作用的，其作用大小取决于天然土层的均匀性和工程师的經驗与技巧。

在某些类型的問題中，試驗室試驗主要是用于說明可以作为判断依据的原則，或者是用于确定可能出現的土壤性质的大致范围。然而，在許多情况中，土质比較均匀或工程比較重要，就要求分析得比較精确些。如果結合工地实测的孔隙压力——这是最难于单凭試驗室資料而确定的一个因素——进行分析，則精度要求尤高。在这方面，特別应注意的三类問題是：

(1) 挡水建筑物（如土坝和堤防）的設計問題，因为它们們的破坏将会造成灾难性的后果，但設計得过于保守，是十分費錢的。

(2) 挖方和天然斜坡的长期稳定性的驗算問題，因为大块土体的滑动会牵涉到邻近的工程建筑物和房屋。

(3) 在厚粘土层上的工程建筑物或房屋的地基問題。

流行的稳定分析和变形計算方法，要求一套試驗資料，唯有利用三軸仪，才能方便地取得这些資料。其理由是：人們认为在常規和研究工作中，用有效应力法进行分析和单独地确定孔隙压力是有益的。

因此，本书仅限于介紹三軸試驗，并提供各种方法，以解决在試驗室中应用三軸仪时所碰到的各种問題。

勿庸多說，只有在了解到工地的地质情况和只有当土样真正代表天然土层或填土时，試驗結果才有实际意义，但对这一問題的精彩探討，不屬於本书所論述的范围。

本书共有四章。在第一章中，結合土力学中經常碰到的实际

3450-41

IV

問題，簡明地討論了強度和變形測定所依據的原理。在第二章中，說明了三軸儀的主要特點，其中包括孔隙壓力、體積變化和荷重量測儀的特點。

在第三章中，介紹了標準試驗的試驗步驟。只要稱得上是設備完善的試驗室，在研究和委託試驗中，都要進行這種試驗。這一章包括了土工顧問工程師有可能提出的所有類型的三軸試驗。

在第四章中，說明了特種試驗。這種試驗看來只有在研究試驗室中才碰得到。在許多情況中，這些試驗乃是在第三章中所介紹的步驟的引伸，並不需詳細加以說明。然而，我們覺得，說明在三軸儀中已經成功地實現了的試驗範圍以及其他的有關問題，還是有相當價值的。

作者並不希望本書起着手冊的作用。本書旨在說明在各種三軸試驗中的重要因素，並喚起人們注意實踐中的細節問題，因為經驗證明這是重要的。

本書主要是根據英國帝國學院土力學試驗室的經驗而撰寫的。這樣做是為了簡化撰稿工作，但並未漠視在別處採用的技術和方法。解決試驗中的機械問題的其它方法，顯然是很多的。然而，作者們所以有信心把書中的方法推薦出來，是因為在大不列顛的許多土工試驗公司和國外的一些試驗室都已採用了這些方法。

作者感謝A.W.斯肯普頓（Skempton）教授，因為他經常加以關懷和鼓勵。在1946年開始成立土力學組時，斯肯普頓教授就決定集中力量研究抗剪強度和穩定問題。這一決定不但為抗剪強度特性精確測定方法的詳細研究提供了機會，還為試驗成果與工程實踐之間的关系的校核提供了條件。

A.W. 毕肖普

D.J. 亨开尔

帝国学院 1957

第二版序言

在本书的第一版中，作者企图为三軸試驗在土力学中的众多的应用，創造一个統一的处理方法。然而，在編写过程中，感觉到流行的步驟不能全面滿足所考虑的广大領域。最明显的缺陷是：非飽和土中的孔隙压力的量測方法，和在測定孔隙压力的各种不排水試驗中，正确的試驗历时的确定方法。

在以往四年中，無論在試驗技术的改进方面或是在这些問題的理論基础的闡明方面，都有了相当大的进展。其中的絕大部分資料，都已发表在土中的孔隙压力和吸力會議（伦敦，1960）、美国土木工程师学会的抗剪强度會議（鮑尔特，科罗拉多，1960）和第五届国际土力学和基础工程會議（巴黎，1961）中。为了把本书的第二版提高到現有水平，在附录中增加了一些資料，摘要地介紹了較重要的技术改进，并提請讀者注意这一領域中的其它新的工作。

本书的原有部分一点也沒有改动，但在某些章节的标题旁增加一星号(★)，这意味着讀者在閱讀該节时，尙需參閱附录六，以便进一步了解。

A.W. 毕肖普

D.J. 亨开尔

帝国学院 1962

目 录

序 言

第二版序言

第一章 緒論	1
第一节 土工試驗的任务	1
第二节 有效应力原理	2
第三节 孔隙压力参数 A 和 B	6
第四节 三軸試驗的种类	10
第五节 应用三軸試驗解决工程問題	26
第六节 三軸試驗的优点和局限性概述	32
第二章 三軸儀的主要特点	41
第一节 試样直径为 $1\frac{1}{2}$ 吋和 4 吋的三軸受压室詳介	41
第二节 控制受压室压力的仪器詳介	53
第三节 孔隙压力測定儀詳介	64
第四节 体积变化測定儀詳介	77
第五节 加荷系統詳介	89
第六节 側面排水濾紙的使用	96
第三章 标准試驗	98
第一节 試样制备	98
第二节 不排水試驗	109
第三节 固結不排水試驗	124
第四节 排水試驗	141
第五节 孔隙压力和消散試驗	153
第六节 側向无应变的試驗 (K_0 試驗)	162
第四章 特种試驗	167
第一节 σ_1 保持不变和 σ_3 减低情况下的飽和粘土的 排水試驗	167
第二节 σ_1 保持不变和 σ_3 减低情况下的非飽和土的 不排水試驗	170

VII

第三节	由于孔隙压力增加而导致破坏的試驗	173
第四节	伸长試驗	176
第五节	各向压力不均等的固結	182
第六节	在控制的应力比下的孔隙压力系数 $\bar{B}$ 的測定	184
第七节	在相当于水庫水位驟降条件下的孔隙压力系数 $\bar{B}$ 的 确定	186
第八节	常体积試驗	188
第九节	确定真凝聚力和真內摩擦角的試驗	189
附录一	橡皮膜和排水滤紙条強度的校正	193
附录二	量力环的特性	197
附录三	加荷活塞上的摩擦力	201
附录四	試驗速率	202
附录五	对于困在試样与橡皮膜之間的空气的校正	207
附录六	1957~1961年期间的发展	209
参考文献		249
单位换算表		256

第一章 緒 論

第一节 土工試驗的任务

历来权威人士都认为影响土体稳定性的某些因素是如此的多变，致使他們认为不考虑这些因素是正确的……，因而他們便简单地回避了实验研究工作。其实，虽然在研究中忽略了这些多变的因素，但是设计工程师以及为数众多的施工人員并没有忽视。在有些实例中，忽视了这些因素后，会导致值得責难的金錢浪费；而在另一些实例中，則造成了声名狼籍的失事。由于目前缺乏实验資料，所以在每一实例中，曾简单地运用了个人的判断，而不是借助于小心的实验研究，但是目前在几乎每一工程学科中都已利用实验研究了（見貝克著的“土中的真实側压力”）。

可惜，在土力学方面的研究活动，有着一种不良的心理影响。許多研究人員和教师在应用数学来解决土工問題时，忽略了自然所强加的种种限制。因此，越来越強調改进取样和試驗方法，以及強調那些能够精确解决的少数問題。唯有当土层在实际上是均匀一致的，而且在水平方向是連續的时候，才能取得精确的解答……在絕大多數的工作中，所需要的不外乎是近似的預測，如果不能用简单方法进行这种預測，那么也就沒有別的办法了（見太沙基和佩克著的“工程实用土力学”一书的序言）。

当土木工程师面临着以土壤作为地基和作为建筑材料而产生的实际問題时，他往往要在下述两种需要之間进行权衡，并作出决定：究竟需要精密的实验研究还是需要使用简单的方法。他的决定取决于他自己的經驗和各个問題的重大或新穎程度。他在作出决定时，往往因为无从确定在每一情况中什么試驗步驟是合适的而且是实际可行的，而增加其困难。

在研究試驗室中，采用精确的甚至复杂的試驗方法是无可爭議的。这些方法在常規試驗中的采纳范围，在很大程度上取决于它們是否能將設計中的不确定程度减少得足以补偿試驗費用。在許多情況下答案是肯定的。然而，在許多不太重要的工程中，却有較大的爭議。如果工程師們自己所累积的經驗知識是以有关的土壤性质和真实建筑物的日后运用情况的定量测定为基础的，那么在将来应用这些經驗知識时才会更有把握。从簡單和复杂的工程中，同样可能取得有价值的資料。

为了在試驗室測定在控制的排水条件下的抗剪强度，以及为了在試驗室測定变形特性（并非压缩性），工程師們全都依靠三軸試驗。然而，試驗可以用不同方式进行。为了将各类試驗区别开来，并且將它們与較为普通的实际問題連系起来，必需簡要地总结一下控制抗剪强度和变形的基本因素。

第二节 有效应力原理★

欲了解土壤的强度和变形特性，最好的方法是假定土壤为由固体土粒所构成的、包含着孔隙的、可压缩的土骨架。在饱和土中，孔隙为水所充滿；在非饱和土中，孔隙内既有水，也有空气。剪应力当然只能为固体土粒的骨架所承受。另一方面，在任一平面上的法向应力一般为两种力所負担，这两种力就是固体土粒所承受的应力和孔隙空間中的流体压力。

从实用观点出发，这有两重要推論：

1. 在法向应力与体积变化之間的关系中，控制因素并不是法向总应力，而是法向总应力和孔隙流体压力（就叫做孔隙压力）之差。四围均等的应力改变后，試样的体积变化可用式（1）定量表示之：

$$\frac{\Delta V}{V} = -C_c (\Delta \sigma - \Delta u), \quad (1)$$

式中 $\Delta V/V$ ——单位体积土壤的体积变化；

$\Delta \sigma$ ——法向总应力的改变；

Δu ——孔隙压力的改变；

C_c ——在所考虑的特定应力范围内，土骨架的压缩性。

差值 $\sigma - u$ 就叫做有效应力，用符号 σ' 表示。必须指出，不论土粒之间的接触面积多大，式 (1) 均是正确的，虽然在工程问题中所出现的应力范围内，此面积看来是微小的。

这一关系可由具有实际意义的、直接从式 (1) 推断出来的结论来说明。如果孔隙压力发生了变化，则即使外加的总应力并不改变，而体积是会变化的 (图 1)。这就是造在粘土上的建筑物发生长期沉降的主要原因，因为粘土地基在施工期所出现的超孔隙压力消散得十分缓慢。这同样可以说明，为了进行施工或抽取用水而降低了地下水位后，为什么建筑物会产生附加的沉降。

2. 土壤的抗剪强度，犹如所有粒状材料的抗剪强度一样，在很大程度上决定于土粒之间接触点在滑动过程中所产生的摩擦力。显然，这摩擦力与其说是法向总应力的函数，不如说是固体骨架所承受的一部分法向应力的函数。为了实用起见，在任何平面上的最大剪阻力 τ_f ，均可用式 (2) 表示：

$$\tau_f = c' + (\sigma - u) \operatorname{tg} \phi', \quad (2)$$

式中 c' —— 表观凝聚力 } 用有效应力表示；
 ϕ' —— 剪阻角
 σ —— 在所研究的平面上的法向总应力；
 u —— 孔隙压力。

在极大多数与稳定有关的工程问题中，根据静力学原理，可以充分准确地估算出在某一潜在滑动面上法向总应力的大小。在另一方面，孔隙压力的大小却受到若干因素的影响，而这些因素往往不能被习用的试验室试验准确地复现。

(a) 在地下水为恒定的最简单情况中，孔隙压力的大小决定于所研究的土块与地下水位的相对位置。当接近稳定渗流情况时 (例如在天然斜坡中，在施工期的孔隙压力消失殆尽后的挖方和土坝中)，孔隙压力可从相当于已知边界条件的流网中取得。

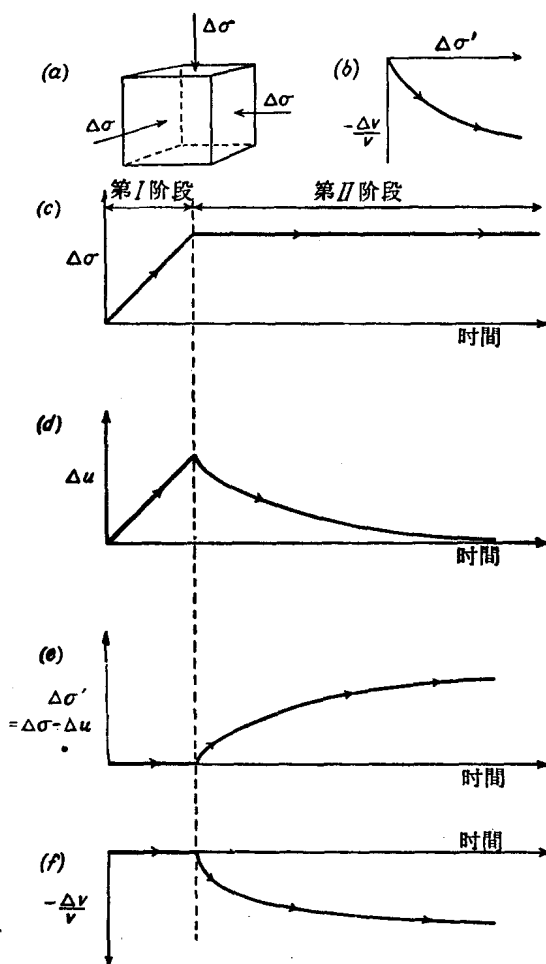


图 1 孔隙压力消散对体积变化的影响

(a)施加在土块上的应力系统；(b)体积减小， $-\Delta V/V$ 与有效应力增量 $\Delta\sigma'$ 之间的关系；(c)试验过程中总应力的改变：第I阶段—在不排水条件下总应力增加 $\Delta\sigma$ ；第II阶段—在总应力保持不变的情况下孔隙压力的消散；

(d)孔隙压力改变 Δu

(e)有效应力改变 $\Delta\sigma'$

(f)体积变化 $-\Delta V/V$

} 在完全饱和土中。

而流网既可用計算法确定，也可根据工地孔隙压力观测結果繪成。

因此，孔隙压力为一独立变量，其大小与法向总应力的大小无关。三軸試驗的功用仅是測定抗剪强度与有效法向应力之間的关系。然而在透水性低的土壤中，需要經過許多年后才能在工地形成稳定的渗流情况。

(b) 比較普遍的情况是，法向应力的改变或土骨架所承受的剪应力的改变，引起土体体积逐渐发生变化。除非排水条件十分良好，因而孔隙中的流体能自由挤出，否則由于应力的改变，将会产生暫时的超孔隙压力。超孔隙压力的消散速率主要取决于土壤的渗透系数，而渗透系数是反映在固結系数中的。对于厚粘土层，以及对于不透水的碾压的填土，消散時間需許多年。在消散期間，孔隙压力取决于下列諸因素：(i) 起始的应力改变；(ii) 固結系数；(iii) 土块与排水面的距离。

在下述受荷情况下所产生的孔隙压力都属于这一类：

- i. 天然地基土层受到建筑物或土坝的荷重；
- ii. 碾压土坝的不透水填土在施工期間受到其上部土层的重量；
- iii. 由于驟降而減退了土坝不透水填土上的水荷重；
- iv. 在天然土层中形成斜坡和开挖后，由于卸除上臥土重而引起的孔隙压力变化。

在这些受荷的情况中，試驗室試驗的任务，不仅是提供抗剪强度与有效应力之間的关系資料，而且还要提供由于应力改变所引起的起始孔隙压力的資料。

因此，应用有效应力原理进行稳定分析时，牵涉到两个步驟。首先确定抗剪强度参数 c' 和 ϕ' ；其次預估建筑物在施工、运用或长期使用阶段所出現的最危險孔隙压力。孔隙压力是两者中較难估計的一种。由于这种原因，在許多重要的工程中，都进行現場孔隙压力观测。

如果促使土体破坏的应力是在仅允許超孔隙压力略有消散的

情況下施加的，則對於這種特殊情況，無需明確地確定孔隙壓力。試樣是在不排水條件下進行試驗的，試驗成果整理成破壞時的剪應力與法向總應力之間的關係曲線，並用總應力法進行類似的穩定分析。

在不排水條件下測得的土壤特性與以有效應力表示的強度特性之間的關係，取決於在試驗中所出現的孔隙壓力的大小。為了清楚了解在外加各種應力組合下產生多大的孔隙壓力，發現應用孔隙壓力參數的概念是方便的（Skempton, 1954; Bishop, 1954a）。這一概念不僅可用來解釋各種類型三軸試驗之間的關係，而且還為估算實際問題中所碰到的孔隙壓力大小提供了基礎。

第三節 孔隙壓力參數 A 和 B^*

欲了解孔隙壓力參數的物理概念，最好的方法是簡單地假設可壓縮的土骨架為一各向同性的彈性材料，並假定孔隙中流體的體積變化與應力之間成線性關係。三個主應力分別增加 $\Delta\sigma_1$ 、 $\Delta\sigma_2$ 和 $\Delta\sigma_3$ 後，體積減少了 $-\Delta V$ （其起始體積為 V ），孔隙壓力隨之增加 Δu 。於是，有效應力增加了：

$$\left. \begin{aligned} \Delta\sigma'_1 &= \Delta\sigma_1 - \Delta u; \\ \Delta\sigma'_2 &= \Delta\sigma_2 - \Delta u; \\ \Delta\sigma'_3 &= \Delta\sigma_3 - \Delta u. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

因此，土骨架體積的減少為

$$-\Delta V = V \cdot \frac{(1-2\mu)}{E} \{ \Delta\sigma'_1 + \Delta\sigma'_2 + \Delta\sigma'_3 \}, \quad (4)$$

式中 E 和 μ 分別為以有效應力表示的楊氏模數和泊桑比。

土骨架體積的減少，幾乎完全是由於孔隙體積減少造成的。如果 n 為起始孔隙率， C_w 為孔隙流體的壓縮性，則在不排水條件下的體積變化與孔隙壓力之間的關係可用式（5）表示：

$$-\Delta V = n \cdot V \cdot C_w \cdot \Delta u. \quad (5)$$

在比較式（4）和（5）後，得：

$$n \cdot C_w \cdot \Delta u = \frac{1-2\mu}{E} \{ \Delta \sigma'_1 + \Delta \sigma'_2 + \Delta \sigma'_3 \}. \quad (6)$$

在研究工作和常規試驗中最常用的一種三軸試驗，就是圓柱形試樣的壓縮試驗（第10頁）。在這種試驗中，應力通常是分兩個階段施加的：（i）增加受壓室壓力，從而產生四圍均等的應力變化；（ii）增加軸向荷重，從而產生主應力差[●]的改變。在試驗中，小和中間主應力兩者的改變（分別為 $\Delta \sigma_3$ 和 $\Delta \sigma_2$ ），等於增加的受壓室壓力；增加的主應力差，等於 $\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3$ 。

以式（3）代入式（6），並令 $\Delta \sigma_2 = \Delta \sigma_3$ ，則得 Δu 的表达式，在推導該式時，將代表受壓室壓力改變 $\Delta \sigma_3$ 的這一項與代表後的主應力差改變（ $\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3$ ）的那一項分离來，

$$\Delta u = \frac{1}{1+n(C_w/C_c)} \left\{ \Delta \sigma_3 + \frac{1}{3} (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \right\}, \quad (7)$$

式中 $C_c = 3(1-2\mu)/E$ ，為土骨架的壓縮性。

從式（7）中很容易看出，孔隙壓力的改變一般首先是由於四圍壓力的改變，其次是由於主應力差的改變而引起的。事實上，土骨架的體積變化特性是非線性的，而且迭加原理只在某些條件下才是正確的。 C_w 值唯有在完全飽和土中才是常數。因此，用兩個經驗參數 A 和 B 表示相應的孔隙壓力改變，即：

$$\Delta u = B \{ \Delta \sigma_3 + A (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \}. \quad (8)$$

對於完全飽和的土壤而言， C_w 值（單是水的 C_w 值）極小，因而設 $B = 1$ 也不致於超出試驗精度範圍。 A 值在很大程度上取決於土壤是正常壓密的還是超壓密的，並取決於所施加的破壞應力的比值（Skempton, 1954; Henkel, 1956），這已為圖2中的試驗成果所證明。在第三章，第138頁上給出了典型原狀和重塑土的 A 值。

● 原文為 Deviator Stress，通常譯成偏應力，在古典力學中，偏應力是指 $\Delta \sigma_1 - (\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_2 + \Delta \sigma_3)/3$ ，但在本書中 Deviator Stress 是指 $\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3$ ，故譯成主應力差。——譯者注

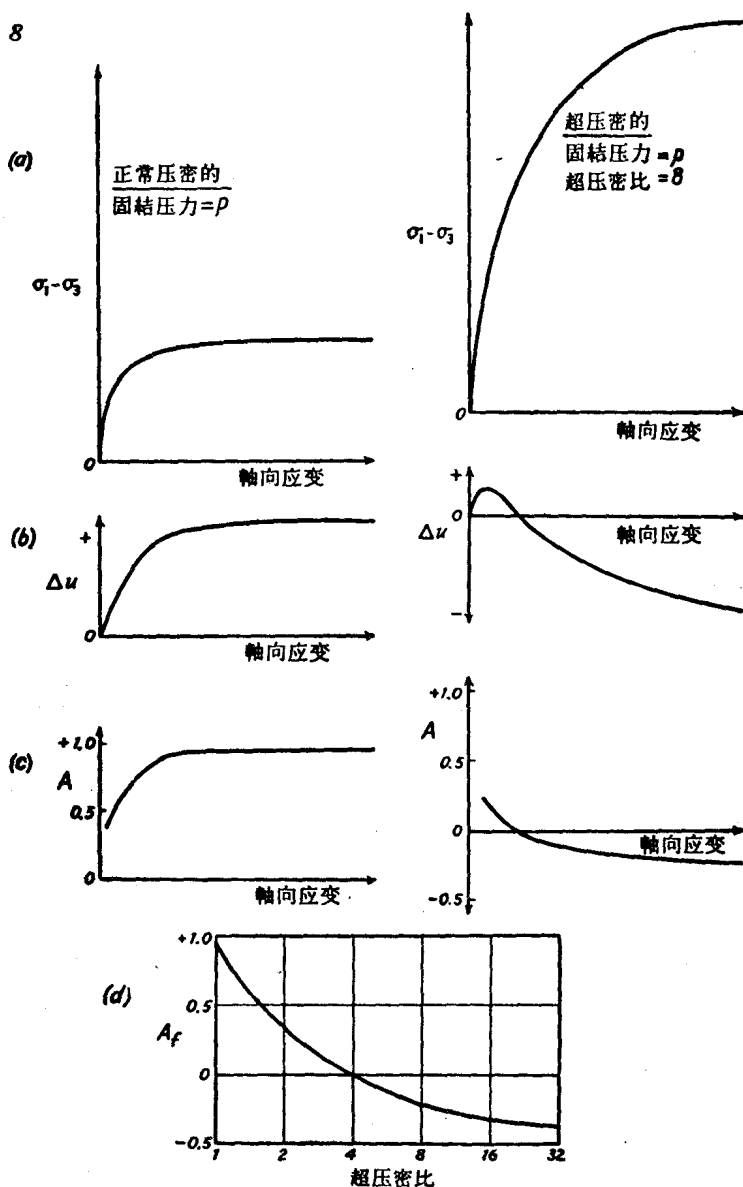


图 2 在施加主应力差的过程中孔隙压力的变化 (正常和超压密粘土试样的典型试验成果)

(a) 主应力差; (b) 孔隙压力变化; (c) 参数 A 值与轴向应变的关系曲线; (d) A_f (在破坏时的 A 值) 与超压密比的关系曲线

在非飽和土的情況中，由於在孔隙空間中存在着空氣^①，所以 C_w 值很高。因此 B 值小於1，並且隨着應力範圍而變。因此，在主應力差（ $\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3$ ）施加期間所適用的 B 值，就不同於在四圍應力 $\Delta\sigma_3$ 施加期間所適用的 B 值。由於這種原因，不將乘項 AB 分离開來，而用 $\bar{A}$ 代表 AB ，則往往是比较方便的。這樣，式（8）可改寫成：

$$\Delta u = B \Delta \sigma_3 + \bar{A} (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3). \quad (9)$$

當試驗目的是精確預估在除却破壞狀態以外的其它應力狀態下的孔隙壓力時，應在試驗中更嚴密地模仿工地應力增量的出現順序，其方法是同時增加 σ_1 和 σ_3 。試驗結果整理成孔隙壓力與大主應力變化之間的关系，并用式（10）表示在規定應力比下的孔隙壓力：

$$\Delta u = \bar{B} \Delta \sigma_1. \quad (10)$$

參數 $\bar{B}$ 的應用實例已在別處討論過（Bishop, 1954a; 1955）。

必須指出，平面應變情況比在標準三軸試驗中所採用的軸對稱情況更接近於許多實際問題。現在尚很少能控制排水條件並能測量孔隙壓力的、符合平面應變條件的儀器^②。採用了修正的中間主應力後，發現 c' 、 ϕ' 以及孔隙壓力參數兩者都有所改變。

將平面應變條件：

$$\Delta \sigma'_2 = \mu (\Delta \sigma'_3 + \Delta \sigma'_1) \quad (11)$$

代入式（6）後，就可看出它對理想彈性土的孔隙壓力參數的影響。

於是，孔隙壓力 Δu 的表达式可寫成：

$$\Delta u = \frac{1}{1+n(C_w/C_c)} \left\{ \Delta \sigma_3 + \frac{1}{2} (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \right\}, \quad (12)$$

① 由於表面張力的作用，使孔隙中的空氣和水的壓力有所差別。嚴格的分析需要一個經過修正的有效應力表达式。對於飽和度高得足以使孔隙水壓力具有實際重要意義的土壤而言，表达式 $\sigma' = \sigma - u$ 是足夠精確的（其中 u 為孔隙水中的壓力）。

② 其困難所在可參見第一章第四節。