

同濟大 推推薦交流講義

土壤力學

說 明

- 一、 我部最近收到各校推薦交流的講義二百餘種，除已有蘇聯教材及需要量不大者外，其餘講義均已印出，這些講義主要是供教師參攷，各校如需採為教材時，可自行翻印。
- 二、 這些講義的內容未經我部審查，內容由原推薦學校負責，參考此項講義的學校，應對講義內容切實提出意見，並將意見扼要填報我部(表格附在講義前面，各校可將意見填上，裁下來寄給我們)，以供今後組織交流時之參考。
- 三、 因謄寫條件的限制，抄寫錯誤在所難免，有些講義原稿錯誤未及改正，有些不全或缺圖，為了在開學前印出供各校參考，謄寫時亦只好照抄。
- 四、 各校對交流講義如有任何意見，請即向我部提出，以改進今後工作。

中央人民政府高等教育部
教學指導司教材編審處

土壤力學講義 (乙)

一九五三年三月重編

目 錄

第一章 引 論

第二章 土壤的性質 ✓

第三章 土体内的應力 ✓

第四章 土壤的變形 ✓

第五章 地基的沉陷 ✓

第六章 土壤的抗剪強度 ✓

第七章 流網——地下水問題

第一章 引 論

§ 1.1. 土壤力學是什麼？要答覆這個問題，先得瞭解土壤是什麼？土壤力學是什麼？

從土木工程的角度看，地球上除岩石以外，所有的鬆散和膠結的顆粒碎塊都是土壤；所以土壤的範圍，包括礫石、礫石、卵石、砂、沉泥（亦稱淤泥）和粘土等；

土壤力學乃根據一般的物理規律（主要是力學和水力學）應用到土壤方面；而經過實踐的攷驗，認為大旨可靠者。

土壤力學的應用，限於解決土木工程的問題，包括：

(1) 土壤的性質，目的是要根據若干種簡單的試驗，把土壤分成若干種類型；這樣便可以把各該類型的規律，作為工程計劃的根據。

(2) 工程方面的應用，包括建建築物的基礎，路基和土堤等，本學程所講授，以建築物基礎的問題為限。

任何建築物都放在地基上面，由“地基”來承受建築物的壓力、建築物的荷重，靠特殊的結構（叫做基礎）傳到“地基”。一般說來，基礎以上的部份（叫做“上部結構”）的設計方法是比較明確的；基礎的設計方法，就比較不明確了；而地基問題最不容易找到一定的規律。

東方和西方的古建築物，至今還保存在亞洲、歐洲和中央亞細亞等地區者，非但因為上部結構能夠長久不壞，也因為基礎和地基長久不壞的緣故。

一切工程建築的設計和修建的主要的要求，是要花費最少量的資金，同時要保證建築物的整體和個別部份，有足夠的強度和穩定性、要合理地設計基礎，計劃地基的處理和施工方法

，必須對於土壤的性質，和地下水的情形，有充分的瞭解；土壤的性質，和地下水情形之瞭解，是屬於土壤力學範圍之內的。

無疑地，有許多的古代建築物的基礎（至今還保存的）照現在的標準看來，是浪費而不合理的；這是因為古代的建築工作者對於土壤沒有能夠深刻瞭解的缘故。

近世的建築物的荷重，遠超過了過去的荷重；過去的浪費而不合理的設計，不再被容許了。因此，三十年来土壤力學工作者的努力使得我們對於土壤能够支承多少重力（叫做“承載量”）有了深刻的認識，但是因為建築物的荷重還是繼續增加，所以對於土壤的性質，還需要繼續研究。

土壤力學關於地基方面所得到的原理和結論，還只可以算是近似的定理原因是這樣的：土壤力學工作者把土壤看做小粒組成的“土壤骨絡”，而忽視了膠體化學的作用；因此，由土壤力學工作者的試驗和理論所得的結論，往往並不完全與實際符合，但是為了實際的需要，在還沒有更好的方法以前，我們不得不採用現有的暫定的試驗方法和理論。

§ 1.2. 土壤力學和基礎工程學發展簡史

在歐美方面，土壤力學的公認的最早的理論是Coulomb的土壤抗剪強度的定律和土壓力的理論，遠在十八世紀下半紀。近世土壤力學的發展，開始在1910以後；在1930以後漸被公認為重要的科學了。值得提起的學者有Terzaghi (奧)；Krey, Kogler (德)；Skempton (英) 等。

在蘇聯方面，尤其是在十月革命以後，在土壤力學及基礎工程方面的成就是很偉大的。在十九世紀，俄國已經有了很好的關於地基和基礎的專書，並且有了關於地基的承載量的論文，彼得堡的建築，對基礎問題提出了新的要求：例如擋土牆和

駁岸應當做到多少深度；因此促進了基礎問題的研究工作、下面是二十世紀初葉和十月革命以後的發展。

格爾西伐諾夫 (Терсѣпанов) 教授的打樁公式 (1917) 和“土壤動力學的原理” (1931) 都是劃時代的鉅著。

在十月革命以後，對於黃土 (loess. 土) 和永凍土 (permafrost, 即終年不解凍的土壤) 有了深入的瞭解；這是在其他國家的著述裡找不到的。中國西北的黃土區域正在進行的建設，就非得吸收蘇聯的先進經驗不可。

沉箱發源於俄羅斯，在蘇聯的氣壓沉箱的工作，工人们沒有危險的；這是資本主義國家完全及不上的。

關於“灌注混凝土樁”和地基的改良方法（例如砂土的化學固結方法），蘇聯是處於領導地位的，這些方法雖然也偶而在資本主義國家採用，但是被認為資本家的商業上的秘密，而不是公開和普及的技術。

蘇聯的地基承載量的規範 (1948) 是最先進的，並已譯成漢文。

中國古代的建築，有很多是完整地保存到現代，無疑地，古代的勞動人民對於地基是有一定的認識的。中國開始注意到土壤力學，約在1940年以前，但是因為學者們只知道盲目地學歐美的一套，工程師們不能也不願意接受新的理論，更因為反動政府的不加重視，所以那時候的土壤力學，完全是脫離實際是點綴品、解放後的情形，完全不同了。在一方面，政府注意到土壤力學的重要性；因此，在學校在試驗室，在工地的鑽探方面，都有了重要的發展，而且還有加速的進步。在另一方面呢，因為基本建設的規模很大，又因為大部份的技術人員過去沒有注意到土壤力學，因而對於土壤力學的原理不能正確地運用，甚至於完全不加以注意；像這樣的做法，當然會形成不安

全和浪費的現象。

所以中國的技術人員，對於土壤力學，還是在初步學習的階段。

§ 1.3. 學習和工作中要防止那些偏向？

在學習土壤力學和基礎工程的時候，我們必須知道我們的時間和能力是很有限的；因此不可能把每一門有關的學科鑽研到底，而不得不接受若干條人家已經從學理或實驗証明了的規律；我們應當重點地抓住基本概念，使得我們將來有需要的時候，可以在已經鞏固了的基本概念上發展下去。

初學的同學，常常容易有下列的二種偏向：第一，他們把數學和計算數字看得太重了；因此，他們要求費很多的時間來用數學証明任何一個公式，他們也覺得只有數字的計算是最好的學習方法，其實，在這種偏向之下，他反而會把用作公式和數字計算的假定和數據的重要性忽略了；他們沒有基本的概念，對於新知識和別人的意見是不可能批判的能力的。第二，他們希望在學程中學到每一個細節，覺得非如此他們便不能在將來好好地運用他們所學到的原理，其實這種理想是不可能的，因為學習的時間很有限；這種理想也是要不得的，因為如此便反而会忽略基本概念。

在實際工作上（主要地在地基的鑽探和計算），我們應當抓住由粗到細的原則；起先是做一個初步的，大概的研究，然後轉到精細的方面；下列四種偏向是很普通的：

(1) 忽視原則，不做鑽探，盲目施工，因而造成浪費和不安全；

(2) 對於地基鑽探和土壤試驗的工作漫無計劃；

(3) 對於技術工作者有過高的要求，希望技術工作者能夠到

場地稍作視察之後，就解決一切問題；

(4) 把地基鑽探和土壤試驗工作，認為應付公事。

討論題 1.1 土壤是什麼？

討論題 1.2 土壤力學討論的是什麼？

討論題 1.3 蘇聯對於那種土壤的研究是很突出的？

討論題 1.4 在學習和工作方面，應當防止那些偏向？

那一種偏向，對你是最容易發生的？

那幾種是有經驗的老工程師容易發生的？

那幾種是領導幹部容易發生的？

第二章 土壤的性質

土壤的成因、土壤分類的初步討論、土壤的成份和結構、土壤的水份、內聚性土壤的性質、土壤的指數特徵——粒徑，顆粒的單位重量，土壤的單位重量，孔隙率 V 和孔隙比 e ，含水量 W 和飽和度 G ，透水率 k ，毛細水頭 h_c ，砂性土壤的緊密度 D ，內聚性土壤的稠性限度，大孔性土壤係數、土壤分類，土壤的凍結和解凍。

§ 2.1. 土壤的成因 土壤係由岩石（火成岩，沉積岩和變質岩）蛻解，經過分裂（機械作用）和分解（化學作用）而形成者。

機械作用的主要因素，包括下列三種：(1) 溫度變化，因為造岩礦物的膨脹係數是不同的，所以溫度的“日變”和“年變”可使岩石裂開、(2) 水滲入岩石的隙縫，冰凍後可使岩石裂開、水流和冰川都能把岩石的碎塊（礫石、礫石，砂，粘土等）

帶到較低的地區，叫做“運搬土壤”，在運搬的過程中，把碎塊磨成較小的顆粒。(3)風的作用是磨蝕和運搬。

化學作用的因素是(1)水(溶解，水合作用)，(2)氧(氧化作用)，和(3)二氧化碳(形成碳酸鹽的沉積)。

岩石經過蛻解之後，少數是留在原來的地點的，叫做“殘留土壤”；多數是由河流，冰川和風力帶到較低的地區，叫做“運搬土壤”。

§ 2.2 土壤分類的初步討論 土壤可分成四大類：

(1)砂土：砂土是鬆散的顆粒；大部份是多面體，各個軸向的大小相差有限(不是柱狀或片狀的)岩石崩解後殘留的砂土，有尖銳的稜角，但是河流的沉積就是磨成圓稜角。

砂土的孔隙率，受到砂粒的形狀，和構成砂層的情況的影響，由水位驟然降低而沉積下來的砂土，都是很稀鬆的；孔隙的容積可達全容積的55%；極密的砂土的孔隙，可能降低至25%、粒徑均勻的砂土的孔隙，大於粒徑大小不一致的砂土。

顆粒愈細者，孔隙率愈高。

砂土上面，受到了外來荷重後，很快地完成了沉陷(在短時期沉陷一些，以後不再沉陷了)；而且這種沉陷的數量是比粘土上面的沉陷要小得多、所以砂土上面的建築物，只發生少量的沉陷；而且這種沉陷，在建築物完工的時候，差不多已經是到了平衡的階段了、因此砂土是很適宜於天然地基的。

砂土的容積，因震動而縮減、因此，震動是把砂土搗實的有效辦法，在另一方面，把震動的基礎(例如機械基礎)放在砂土上面是可能發生大量的沉陷的。

(2)粘土 粘土是內聚性的土壤、如果是曾經長期受到高壓力的粘土，便是很堅實的(孔隙率很低)；而且顆粒間存在膠

合作用，但是一般的粘土並沒有壓到很堅實，孔隙率可達全容積的 50% 以上。

乾燥的粘土遇到了水，便會吸收水份，逐漸軟化。

粘土的透水率很低，如果在飽和的粘土上進行建築，那末，荷重加在粘土上之後雖然會使粘土的孔隙縮減，但是因為孔隙內所含的水份不容易排洩（因為透水率很低）這種壓縮是要經過很長久的過程，始能完成的，所以粘土上的建築物的沉陷，是逐年增加的，這是粘土地基的一個大缺點。

(3) 砂質壤土和粘質壤土：這兩種土壤，是介乎砂土和粘土之間的，粘質壤土的透水率較砂質壤土為低，這兩種土壤的定義，見 § 2.6.

[註] 砂質壤土 (суглинок) 的譯名極不一致，直譯應為“亞砂土”（或英文 Sub-sand），粘質壤土的譯名也不一致；直譯應為“亞粘土”（或英文 Sub-clay）。

(4) 沉泥（淤泥）(ил, silt)：沉泥也是介乎砂土和粘土之間的土壤；它們是礦物的沉積，可能有些有機質腐蝕的殘餘。乾燥的沉泥是堅硬的；但是浸水飽和後，變成稀薄，體積脹大，沉泥的孔隙率，變化範圍很大，視土層上面的荷重大小而定，沉泥的透水率不很大，和粘質壤土接近。

沉泥如果含有機質，便會有一些內聚性；但是很微弱的。沉泥的顏色，從灰至黑色；在工地很容易誤認為粘土，可用“搖動試驗”來鑑別：把少許的土樣放在手掌上，搖動後即因水份向外流出而變成光亮；但是用手指一捏，又暗淡無光了（因為水份又吸進去了）這種性質，叫做“脅脹性” (dilatancy)；沉泥和細砂土都具有脅脹性（但含水量太高或太低時搖動試驗無效應）；一般的砂土沒有脅脹性（因為透水率很高，水份

太容易消失)；粘土也沒有膨脹性(因為透水率很低水份不易流動)。

砂土和粘土性質的區別，是土壤力學的一個重要問題，格爾西伐諾夫教授的報導如下：

《(1)粘土的含水量(以單位重量的乾土含水份若干重量計)變化範圍頗大，從3% (堅硬粘土)到60% (河口的粘土沉積)砂土的含水量的變化範圍要小得多，從0% (乾的粗砂)到40% (流動砂土)。

《(2)粘土在乾燥的過程中，有三種狀態：流体狀態(流動粘土)、塑體狀態，及固體狀態。粘土乾燥到了固體狀態之後，非常堅硬，人工不易挖掘，須使用炸藥、粘土在塑體狀態時，稍有一些外力，即可使之變形但土樣的容積不增減。

《砂土在乾燥的過程中，只有兩種狀態：如果是粗砂土，從流体狀態變到鬆散的顆粒；如果是很細的砂土，從流体狀態到固體狀態，所以砂土是沒有塑體狀態的，換言之，即：粘土是塑性的，而砂土是沒有塑性的。

《(3)粘土逐漸乾燥時，體積收縮，發生裂縫；砂土沒有這種現象。

《(4)粘土具有可壓縮性，砂土幾乎是不可壓縮的。

《(5)粘土上面受到外力之後壓縮得很慢(體積逐漸收縮)。砂土受到外力之後，很快地完成少許的壓縮量，此後不再壓縮了。

《(6)砂土在任何狀態下是透水的；粗砂的透水率很高，因此可用作排水層，粘土(在固體及塑體狀態時)幾乎是不透水的。

上面是砂土和粘土的區別，非常明確，但是常常為碰到一些土壤是砂土和粘土混合在一起的；性質在粘土和砂土之間。

§ 2.3. 土壤的成份和結構 土壤由固體的顆粒，水和空氣三種成份組成；水和空氣，佔據顆粒間的孔隙。

顆粒的大部份是礦物；有機質僅佔極少部份，或者全然沒有。

砂土的主要礦物為石英，雲母，長石等；粘土的主要礦物為高嶺土，微晶高嶺土，滑石，雲母等。

含有機質的土壤，叫做有機性土壤；這種土壤大半是深色（深灰至黑色），有腐殖的臭味。靠近地面的粘土，很多是有機性的、深埋地下的有機性土壤（例如泥碳）所含的氣體，對工人有生命的危險。

土壤可視作礦物的“分散系”、“分散系”和“溶液”不同：溶液為“分子的分散系”其中不可能找到兩種物質（例如水和鹽）的分界，這是“單相”的；但是土壤的分散系，是存在着固體顆粒和水（或氣）的划分界線的，所以是“二相”的或“多相”的分散系。

多相分散系（例如飽和的土壤）內的連續的“相”叫做“分散介質”（例如水），不連續的“相”叫做“分散質”（例如土壤的顆粒）。

按“分散質”的粗細程度，得分成下列三種：

(1) 粗分散系，分散質的粒徑大於 0.005 (mm) 。

(2) 細分散系， $0.005 \sim 0.0001 \text{ (mm)}$

(3) 膠態分散系， $0.0001 \sim 0.000,001 \text{ (mm)}$

[註] 水的分子的直徑為 $0.000,000,4 \text{ (mm)}$

這三種分散系的分別，如表 2.3.4 所示：

表 2.3 A 分散系的性質

粗 粒	細 粒	微 粒 (膠 態)
粒徑 > 0.005 {mm}	$0.005 \sim 0.0001$ {mm}	$0.0001 \sim 0.000,001$ {mm}
目力所能見或顯微鏡下所能見	顯微鏡下所能見	超顯微鏡下所能見
不能透過濾水紙		能透過濾水紙
不能用滲析法 (dialysis, ultra-filtration) (不能透過動物膜或植物膜)		
不能凝固 (coagulate) 或者僅有很微弱的凝固	能 够 凝 固	

如果分散介質為液体時，這種膠態分散系多少帶有滯性、(viscosity)，叫做“溶膠”(sol)。成為分散質的固体部份，得從膠態分散系的液体分離出來，形成帶有固体性質的沉澱，叫做“凝膠”(gel)。

巴伯可夫 (Baskob) 等的土壤學和土壤力學內關於膠態的敘述，節譯如後：

“膠態顆粒 (micelle, colloiddion) 為固体的 (懸浮狀態的 (in suspension)) 或液体的 (乳膠狀態的 (in emulsion)) 的“核” (nucleus)；“核”的周圍，有緊靠着的一層陽或陰离子——叫做“內層”、膠態顆粒帶有一定數量的電荷、包圍着顆粒的“分散介質”有相反電荷的离子；這種反荷离子在顆粒的周圍，形成“擴散層” (diffusion layer) 在“擴散層”內，離子分佈的密度 (即每單位體積內所含離子之數) 不是均勻的；愈靠近顆粒的表面，密度愈高，而且是急驟增高的。

“擴散層”和“內層”緊靠着，成為“雙電層” (electrical double layer)。

“分散質”(膠態顆粒),以及“分散介質”(例如土壤的水)和電解質(電解質在“分散介質”內成為“分子分散系”),對於膠態顆粒的結構,是有重要的作用的,在土壤內,水在顆粒的“擴散層”的周圍形成了“水離層”。

“水離層”內的水分子,對於“擴散層”有一定方向的分佈。因此,“水離層”的水份具有特殊的性質:較高的密度和滯性;圍繞着膠態顆粒形成了“滯性水”的薄膜。

土壤的結構,由下列三種情況決定之:(1)個別的礦物顆粒,或它們的聚集体(*aggregate*)的大小和形狀;(2)這些成份的相互排列關係;和(3)它們是否有內聚力。

土壤的結構的分類,最重要者為:(1)單粒結構,和(2)聚集体結構。

岩石崩解後產生的粗粒(礫石,礫石)和中粒(砂)具有單粒結構。

[註] 礫石,礫石,砂等的定義,見§2.7;又見基礎工程講義第一章。

聚集体結構為“細粒分散系”和“微粒分散系”(粘土類即內聚性土壤類)所特有的結構、聚集体內的顆粒的粒徑大小很有不同:最小者甚至於顯微鏡下都看不清;最大者是肉眼看得清的,但在大顆粒的表面,有膠態顆粒形成了“膠態包層”。這種膠態包層具有彈性;它們使得聚集体土壤具有彈性,可壓縮性和內聚性等。

土壤的結構,並不是永久固定不變的;而是能夠因為地質變化和人工的影響,變成堅實,鬆散,或者破壞了、在土壤內打樁便是一個例子。

§2.4. 土壤的水份 土壤所含的水份,可以分成下列二

個主要的類型：

(1) 結合水 (Связанная вода)；

(2) 自由水 (重力水)

(1) 結合水為薄膜，由分子吸引力的作用，緊附在土壤顆粒的表面、根據水分子對於土壤顆粒的粘結作用，可以把“結合水”分成二種：(a) 濕存水 (hygroscopic water) 和 (b) 滲附水 (osmotic water)。

濕存水最牢固地連繫在“雙電層”的內層，乾的土壤，立刻會從空氣中吸收水份，成為“濕存水”、濕存水的數量，隨着空氣的濕度而增減、ПАНКОВСКИЙ 氏報導“濕存水”含量如下：

砂土 (伏尔加河下游)	0.36 %
粘質壤土 (參攷 § 2.7)	3.18 %
粘土 (莫斯科流域)	13.73 %

如果土壤只有“濕存水”而沒有其他水份時，砂土看起來是乾的；粘土像乾燥的固體，但是可用人力磨成“乾”的粉末。

“濕存水”不可能從一個土粒遷移到另一土粒。

“滲附水”是水離性的包層、把滲附水吸着向顆粒表面的力，在離顆粒表面向外的方向，很快地減弱了。

粘土內如果有高度滯性的“滲附水”，便是半固體；如果有低度滯性的“滲附水”，便是塑體。

[註] 半固體和塑體的解釋，見 § 2.6 (9)。

(2) 自由水存在於土壤的孔隙間，在分子力作用的勢力範圍以外。

自由水分為“土壤水”（普通稱為“地下水”）和“毛細水”；後者的命名，是比擬着毛細現象（水在小管中上升的現象）。

在地層中，“毛细水”可以分為三層：(1) 不連續的毛细水層（不可移動的）；(2) 中層是連續的，但是孔隙內的氣泡是不連續的；(3) 毛细飽和層（直接在“土壤水”的上面）。

土壤所含毛细水的最大含量，叫做“毛细水容量”、粗粒土壤的毛细水容量可達16~18%；粘性土壤（冰川沉積）可達35~40%。

“土壤水”和“毛细水”的不同，乃是：前者在土壤內的移動，只受到重力和外的影響（而後者是同時受到表面張力的影響的）“土壤水”對於土壤有下列的影響：

(1) 溶解和滲濾作用 (solutioning and leaching)，主要是對於土壤和基礎工程的某些成份、這種作用可能是對於基礎工程有害的（例如酸性的土壤水），其為害性的程度和土壤水的成份和流速有關。

(2) 浮力作用（亞基米德原理）

(3) 水流的冲刷作用；由於水流的動力，可以把土壤內較細的顆粒帶走（內部的冲刷作用），或者甚至於把土壤冲成鬆散（流砂現象，見第七章）。

§ 2.5. 內聚性土壤的性質 內聚性土壤（粘性土壤）主要地包括粘土和粘質壤土（定義見§ 2.7）。它們的主要的物理性質和物理化學性質為：(1) 電的性質，(2) 吸着性，(3) 凝結性，(4) 內聚性（或線粘性），(5) 塑性，(6) 觸变性，(7) 含氣性。

(1) 電的性質 電流對於膠態顆粒的影響，是“電泳” (electrophoresis)（膠態顆粒從一個電極，流到另一個電極）和“電滲” (electroosmosis)（水份從一個電極流到另一個電極）。這個原理，可以用來改良內聚性土壤的性質（見基礎工程講義第十章）

(2) 吸着性 土壤會從水溶液或空氣混合體內吸收一部份、

這種性質是複雜而尚未完全明瞭的，吸着性可以分做兩種：吸咐性，吸收性和化學吸收性。

吸咐性是指限於顆粒表層的吸着作用。

吸收性是吸收到顆粒裡面，成為“固体溶液”的性質，與“分子力”有關。

化學吸收性是吸收了和顆粒發生化學作用的。

(3) 凝結性 (Coagulation) 係指小顆粒凝結在一起，形成大粒的“聚集体”當顆粒間的相互吸引力克服了相互排斥力的時候，便會發生凝結作用，主要的凝結作用為電解質凝結作用（由於電解質的濃度的增加）和膠粒凝結作用（由於不同電荷的膠粒的存在；例氫氧化鐵或鋁酸鐵為正極的，磷酸或腐植酸的鹽類為負極的）。

和“凝結作用”相反的是“膠溶作用” (peptization) 或分散作用 (dispersion)。

(4) 內聚性 (cohesion, 參攷第六章)、在不久以前，有許多學者認為“內聚性”是由於顆粒間的毛細水的表面張力，構成了顆粒間相互作用的“內在壓力”；因而使得顆粒間的相互滑動，受到抵抗力（使得土壤具有抗剪強度）、這種學說是很不完全的。

砂土含有水份（但不能和時）具有少許的內聚力；這是由於毛細作用的。

粘土的內聚力，按照 Денисов 教授等的試驗結果，常常是不能用“毛細”理論來解釋的；而是複雜的現象，由於顆粒的水薄膜的作用，（由於分子力），和化學成份的膠結作用。

(5) 塑性 係指物體（土壤）受外力後能改變形，但體積不增減，並且不裂開，土壤的塑性用某種含水量限度（見 §2.6）來表示。