

科技用書

土壤力學精要

工學博士 游啓亨 著

大行出版社印行

科技用書

土壤力學精要

工學博士 游啓亨 著

大行出版社印行

003-004



中華民國七十一年五月 日初版

書名：土壤力學精要

著作者：游 · 啓 · 亨 著

發行人：裴 振 九

出版者：大 行 出 版 社

社址：台南市體育路41巷26號

電話：6 5 1 9 1 6 號

本社免費郵政劃撥帳號南字第32936號

本社登記證字第：行政院新聞局

局版台業字第0395號

總經銷：成大書局有限公司

台南市體育路41巷26號

電話：6 1 3 6 8 5 號

特 價：平一九五元精二三五元

編 號：B 0 0 2 0 - 0 0 5 6 3

同業友好·敬請愛護

Handwritten signature/initials: H. H. H. / 10

土壤力學精要

序

近年來土壤力學有關論文書籍之出版問世頗多，土壤力學不僅在土木建築工程應用上既屬重要部門，而且研究範疇愈趨廣泛，研究專題愈加精細。

筆者在國立成功大學工學院土木工程學系及水利工程學系授課「土壤力學及基礎工程」二十載餘，因吾國大學「土壤力學」「基礎工程」之課程，包括土壤力學實驗三小時一學分在內，仍規定為五學分，授課時數有限，教材詳解及新論介紹頗感不易。

本書依新章節、公制、問答之型式，摘取土壤力學之精華要訣，專供國立成功大學同學自修思考，以輔課餘演習之用。本書倉促付梓，疏漏難免，不妥之處，尚祈斯界彥碩不吝賜教，以使再版時訂正是幸。

游 啓 亨

民國七十一年五月

目 錄

第 一 章	土壤與岩石之風化	1
第 二 章	土壤之天然性質與結構	15
第 三 章	土壤之分析與分類	35
第 四 章	土壤之滲透性與毛細管作用	62
第 五 章	流線網與滲流量之計算	86
第 六 章	土壤之壓縮特性	106
第 七 章	土壤之抗剪強度	132
第 八 章	壓力之分佈與傳播	152
第 九 章	土壤容許承載重與沉陷量	181
第 十 章	土壓力之理論與計算	203
第十一章	土坡之穩定分析	242
第十二章	土壤之壓實	257
第十三章	基礎型式之種類與選定	269
第十四章	樁基種類與承載重	281
第十五章	鑽探與地質調查	316
參考書籍		329
附 表		331

第一章 土壤與岩石之風化

【1—1】何謂土壤？何謂土壤力學？試申述之。

【解答】

地球外殼之火成岩、水成岩及變質岩等岩石，經風化作用所成之鬆疏或不甚堅硬之小礫石、砂、粉土及粘土等之沉積物或堆積物稱為土壤。

當土木建築構造物以土壤為基礎地盤時，如竣工後之各項工程由於基礎土壤承載重之不足或基礎土壤之不均勻沉陷，可能發生極嚴重之危險。當土木建築構造物採用土壤為全部或局部工程材料時，如竣工後之各項工程由於土壤之不堅實或抗剪強度之不足，可能造成極嚴重之損害。故凡以工程基礎及工程材料之觀點研究土壤之科學稱為土壤力學。

【1—2】試將 Webster 英語國際辭典 (1956) 內之有關土壤之定義，譯成中文。

“The soil is the loose surface material of the earth in which plants grow, in most cases consisting of disintegrated rock with an admixture of organic matter.”

【解答】

土壤係植物賴以成長之地球之鬆疏表面物質，於通常情況包括分裂岩石及有機物質之混合物。

【1—3】試將工程地質學教授 Ries 及 Watson 之有關土壤之定義，譯成中文。

“The soil may be considered as the superficial, unconsolidated mantle of disintegrated and decomposed rock material, which, when

acted upon by organic agencies, and mixed with varying amounts of organic matter, may furnish conditions necessary for the growth of plants. In this broadest sense, the term soil has been used by geologists to include all the mantle of rock decay."

【解答】

土壤被認為分裂岩石及分解岩石之未固結之淺薄被覆層，經受有機物作用而混合不同量之有機物質時，可供植物成長所需條件。於此項廣義下，地質學家所用之土壤名辭包括岩石腐化之全部被覆層。

【1—4】試將土壤學教授 Joffe 之有關土壤之定義，譯成中文。

"The soil is a natural body, differentiated into horizons of mineral and organic constituents, usually unconsolidated, of variable depths, which differs from the parent material below in morphology, physical properties and composition, and biological characteristics."

【解答】

土壤係自然實體，礦物及有機物成份依層不同，通常未固結而深度不定，於形態學，物理特性，組成及生物學特性上，均與底層母岩有所差異。

【1—5】試將土壤力學教授 Jumikis 之有關土壤之定義，譯成中文。

"The soil is the unconsolidated sediments and deposits of solid particles derived from the disintegration of rock."

【解答】

土壤係岩石分裂所成之固體顆粒之未固結沉澱物及堆積物。

【1——6】試將土壤力學教授 Terzaghi 之有關土壤力學之定義，譯成中文。

“Soil Mechanics is the application of the laws of mechanics and hydraulics to engineering problems dealing with sediments and other unconsolidated accumulations of solid particles produced by the mechanical and chemical disintegration of rocks regardless of whether or not they contain an admixture of organic constituents.”

【解答】

岩石之物理及化學分解所成之固體顆粒之沉澱物及其他未固結堆積物，無論包容有機物質與否，其工程問題將以力學及水力學之定律加予應用之科學稱為土壤力學。

【1——7】試舉17世紀~19世紀對土壤研究頗有貢獻之著名學者。

【解答】

17世紀末葉，法國軍事工程師自堡壘擁壁之設計工作，促進擋土牆之土壓力分析及研究。著名法國科學家及軍事工程師 Coulomb 對彈性體力學之研究頗有成就，提倡滑動土楔理論，計算作用於擋土牆之土壓力及擋土牆之臨界高度，被認為正統土壓力理論 (classical earth pressure theory) 之創始人。著名之幾何學家及投影幾何學之創始人 Poncelet，繼據庫隆土壓力理論，發表作用於各種擋土牆之土壓力圖解法。1866年 Culmann 復據庫隆—彭思烈理論，發表關於最複雜情況之擋土牆土壓力圖解法。土壤之滲透性有關之達塞定律係1856年法國物理學家 Darcy 所發表，土壤之比重計分析有關之斯篤克定律亦源於1856年。1857年英國克拉哥大學教授及著名鐵路工程師 Rankine 發表土壓力及土體平衡之著名理論，指明均等質，粒狀，非壓縮性及無凝聚性土壤之擋土牆尺寸之分析方法。1871年 Mohr 研究物體承受壓力作用後之破壞理論，以摩爾氏圓表示應力圖解法。繼後 Boussinesque 研究載重作用於半無限，無凝聚性及均等質土壤有關之應力及變形理論。

【1—8】試舉西曆 1900 年後對土壤力學頗有貢獻之著名學者。

【解答】

20世紀以後之土壤有關研究可分二期，一為 1925 年前期，二為 1925 年後期。1925 年前期為現代土壤力學之開拓時期，土壤物理特性之研究漸成為學者及工程師所注意，如瑞典之物理學家 Atterberg 自 1900 年開始研究土壤之分類方法，土壤之塑性及含水限界等特性。1913 年「瑞典國有鐵路局土工技術委員會」於瑞典成立，成為世界第一個土壤研究試驗機構後，芬蘭、丹麥、挪威、北歐各國亦於鐵路局下設立相似機構，以便推進土壤之研究工作。歐洲之其他各國如英國、德國及法國之學者，亦對土壤之試驗及數學解析頗有貢獻。1925 年 Terzaghi 在維也納出版“Erdbaumechnik”乙書，發表各種載重與含水量情況之土壤特性，土壤強度與水表面張力之有關問題，粘土之固結理論，沉降量及沉降時間之預估等數學解析後，土壤力學遂於土木工程之範疇內自成一部專門學科。土壤力學問世以後，研究土壤力學及基礎工程方面之學者及工程師輩出，其中以 Taylor, Casagrande, Peck, Skempton 及 Bjerrum 之貢獻最卓著，均被認為近代土壤力學及基礎工程學術界之權威。

【1—9】試述岩石之種類及特性。

【解答】

岩石得分成火成岩、水成岩及變質岩三種。

火成岩 (Igneous Rock) 係由地球內部之高熱岩漿侵入地殼內部或噴出地殼外面，待冷凝結所成者，完全不含有化石之類，全部或一部份為玻璃質，岩石之表面無層狀、帶狀或葉片狀構造，如花崗岩、正長岩及玄武岩。水成岩 (Sedimentary Rock) 係先成之火成岩、變質岩或水成岩經風化作用腐解後，被搬運沈積固結所成者，常呈成層現象，而不甚堅硬如砂岩、頁岩、石灰岩。變質岩 (Metamorphic Rock) 係火成岩或水成岩經壓力、地熱及水蒸氣之地質作用，使岩質重行組織變質所成者，如片麻岩、大理石、蛇紋岩。

【1—10】試舉地球外殼之主要岩石構成比。

【解答】

地殼大致由 95 % 火成岩與 5 % 水成岩及變質岩所構成，但露出於地表面部份以水成岩為最多，水成岩之面積幾乎到達岩石面積之 75 %。最主要之地球外殼之岩石依次為頁岩、砂岩、花崗岩、石灰岩、玄武岩，如表 1—10 所示。

表 1—10 地球外殼之主要岩石百分比

岩石名稱	頁岩	砂岩	花崗岩	石灰岩	玄武岩	其他
百分比(%)	52	15	15	7	3	8

〔摘自 Leopold, Wolman 及 Miller (1964) 〕

【1—11】試舉地球外殼之主要礦物及化學元素構成比。

【解答】

地球外殼之主要礦物共為六種；長石、石英、粘土礦物、方解石、氧化鐵類及輝石等，其構成百分比如表 1—11 (a) 所示。

表 1—11 (a) 地球外殼之主要礦物百分比

礦物名稱	長石	石英	粘土礦物 母岩	方解石	氧化鐵類	輝石 閃石	其他 礦物
百分比(%)	30	28	18	9	4	1	10

〔摘自 Leopold, Wolman 及 Miller (1964) 〕

地球外殼之主要化學元素共為八種；氧 (O)、矽 (Si)、鋁 (Al)、鐵 (Fe)、鎂 (Mg)、鈣 (Ca)、鈉 (Na)、鉀 (K)，其構成百分比如表 1—11 (b) 所示。

表 1—11 (b) 地球外殼之主要化學元素

化 學 元 素 名 稱	氧	矽	鋁	鐵	鎂	鈣	鈉	鉀	其 他
重 量 百 分 比 (%)	46.60	27.72	8.13	5.00	2.09	3.63	2.83	2.59	1.41
體 積 百 分 比 (%)	93.77	0.86	0.47	0.43	0.29	1.03	1.32	1.83	

〔摘自 Mason (1966) 〕

【1——12】何謂岩石之風化作用？試申述之。

【解答】

地球外殼之火成岩、水成岩及變質岩如暴露於大氣中，經長久時日之後，產生自然破碎或腐爛，此項自然作用稱為岩石之風化作用（Weathering）。

岩石之風化作用大致可分成物理作用、化學作用及有機作用三種。物理作用可使岩石破碎，但不改變其成份，包括結冰時體積膨脹所產生之岩石張裂，日夜溫度差及季節性溫度變化所產生之收縮及破裂，雨水、河流、冰河、波浪所造成之侵蝕作用，大風所造成之剝蝕作用等。化學作用可使岩石腐爛，改變其成份，與物理作用相互配合加速風化之進行，包括氧化、水化、碳化及溶解作用。有機作用亦稱生物作用，如腐爛植物所造成之腐植土吸收大氣中之水份成為有機酸後之侵蝕作用。

【1——13】試述土層斷面A層、B層、C層及D層之區別及特性。

【解答】

經岩石之風化作用，岩石之外部破碎腐爛變化而成土壤。岩石風化之程度愈近地面愈顯著，故其斷面自上而下得分為四層。初為上層土（Top-Soil），稱為A層（A-horizon），因生物之活動，雜有植物質，且完全氧化與水化之故，常呈黑色或暗褐色。A層中亦因受溶濾作用，尚有土色改淺而呈粗糙組織者。稍下為下層土（Sub-Soil），稱為B層（B-horizon），土色較淡，具有微細顆粒不易透水，中雜未經風化之岩石。再下為C層（C-horizon）視之似堅，但觸之即

碎，因受相當風化作用之故。自此以下，始漸入完全未受風化作用之原狀之岩石層，稱為D層（D-horizon）。

A層亦分 A_0 、 A_1 、 A_2 及 A_3 層；

A_0 為腐土及岩石屑

A_1 為暗色，有機物及礦物質混合之土層

A_2 為淺色，經高度濾解之土層

A_3 為 A B 之交接層

B層亦分 B_1 、 B_2 及 B_3 層；

B_1 為 A B 交接層

B_2 為深色，濾解物所沉積之土層

B_3 為含少量母岩質之土層

【1—14】試述臺灣省主要母岩之分佈情況及特性。

【解答】

臺灣省地質構造大致得分成；生成時代未詳之變質岩層、新生代第三紀層及新生代第四紀層。主要母岩為結晶片岩、片麻岩、粘板岩、砂岩、頁岩、礫岩、玄武岩及石灰岩等，其分佈情況及特性如表 1—14 所示。

表 1—14 臺灣省主要母岩之分佈情況及特性

地 質 分 類	母 岩 名 稱	分 佈 情 況 及 特 性
變 質 岩 層 (生成時代未詳)	結 晶 片 岩 結 晶 石 灰 岩 片 麻 岩	分佈於中央山脈之東側，北部臨太平洋成為大斷崖，幅度較寬，南部至臺東之西面山麓，幅度較狹。岩質堅硬，風化及侵蝕抵抗力強。
	粘板岩、硬砂岩、千枚岩	分佈於中平及玉山山脈而成為粘板岩系，係粘板岩，硬砂岩及千枚岩之互層。此項粘板岩之風化抵抗力強，風化土層深為一公尺左右，含有破碎岩片。
新 生 代 第 三 紀 層	硬砂岩、頁岩	分佈於阿里山，恒春及臺東山脈而成為阿里山層。砂岩堅硬，惟頁岩軟弱，甚易崩壞。
	泥板岩、砂岩	分佈於阿里山層之西部而成為苗栗層。北部錦水附近以砂岩，頁岩為主。此項砂岩質軟，泥板岩，頁岩軟弱，易被侵蝕。
	礫 岩	礫岩層為苗栗層之漸移區，北部起於苗栗，南部至高雄。礫岩中之粘土質遇水份則流失，多呈凹凸不平現象。
	玄 武 岩	分佈於澎湖群島，組織緻密，風化抵抗力甚強。

新 生 代 第 四 紀 層	琉球石灰岩	琉球石灰岩為古代珊瑚礁隆起所生成，位於海拔二百公尺左右之處，如高雄市之壽山、旗後、鳳山之丘陵、鵝鑾鼻台地等屬之。
	洪 積 層	分佈於桃園奇地、苗栗、大肚、八卦及嘉南丘陵地區，北部為海拔三百公尺左右，中部地勢較高。洪積層之表層為紅土，下層由礫石所構成，易被侵蝕。
	冲 積 層	冲積層乃構成平原、盆地，為工程及農業利用之對象。

【1—15】試述河流之侵蝕、運搬及沉積三種作用。

【解答】

河流將岩石風化後之殘留表土或未經風化之岩石脫離母岩之作用稱為侵蝕作用(Denudation)。河流將侵蝕後之土壤或岩石挾帶搬運至遠方之作用為運搬作用(Transportation)。當河流之坡度較平或河流流入面積甚寬之海口時，所挾土壤遂成沉積，此項作用稱為沉積作用(Sedimentation)。河流之侵蝕運搬及沉積作用與河流之平均流速及土粒粒徑大小有關如圖 1—15 所示。據 Krumbein 之研究，以粒徑 0.1 mm 之土壤為例，流速超出 30 cm/sec 時產生侵蝕作用，於流速 30~0.8 cm/sec 時產生搬運作用，而流速減為 0.8 cm/sec 以下時產生沉積作用。

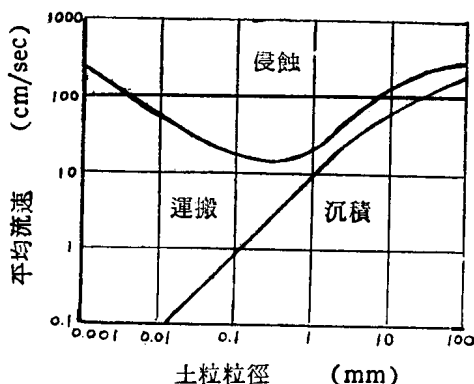


圖 1—15 流速及河川之三種作用

【1—16】何謂運搬土壤？試申述之。

【解答】

土壤風化後經風力吹動，雨水冲刷或其他自然條件，而移動其原位來置者，

稱為運搬土壤 (Transported Soil)。因運搬主力不同，分成重力沉積、沖積沉積、風成沉積及冰河沉積四種。重力沉積 (Colluvial Deposits) 係因重力關係或重力作用，而發生土壤下墜或崩落後所成者。沖積沉積 (Alluvial Deposits) 係河流運搬上游侵蝕土壤至下游之坡度較平，河道較寬之平坦地區，因流速減慢而致土壤沉積者。河流運搬所成之土壤稱為沖積土壤 (Alluvial Soil)，如沖積丘、沖積平原、三角洲及沙洲皆是。風成沉積 (Aeolian Deposits) 係由風力運搬所成之土壤沉積，如沙丘及分布於吾國北部各省之黃土 (Loess) 均為風積土壤。冰河沉積 (Glacial Deposits) 係冰河挾帶之砂礫於溫暖地區冰塊溶解時所成，如冰堆石、冰漂石、漂積粘土。

【1——17】何謂紅壤土？何謂灰壤土？試申述之。

【解答】

於高溫多雨之熱帶或亞熱帶地區，如排水情況良好，土壤內之有機物及二價之氧化物易被溶解而沖失，僅存留三價之氧化物，如氧化鐵 (Fe_2O_3)，礬土 (Al_2O_3) 等，所造成之土壤呈紅色，此項土壤稱為紅壤土 (Laterite)。

於溫帶地區，雨量適中，冷熱有週期性，含多量腐爛植物之腐植土吸收大氣中之水份成為有機酸後，如排水情況良好，此項有機酸溶解上層土內之氧化鐵及礬土，繼後溶濾物質聚結於下層土中，故上層土受漂洗呈灰色，具強酸性，含碳酸之類，此項土壤稱為灰壤土 (Podzol)。

【1——18】何謂泥炭土？試申述之。

【解答】

泥炭係寒冷潤濕地區之草、苔蘚及其他植物之遺體及腐爛所成，以肉眼可識別原植物之組織為黑褐色塊體，類似膠狀或乾酪狀之性質，具有彈性，含水量大，高達 100 % 以上。通常泥炭沼澤中，由頂而下，其剖面為生長植物層、死亡植物之根莖葉層及各種泥炭層，而植物逐漸變泥炭時，氫及氧之含量減少，碳之含量則增加。通常泥炭含量 50 % 以上之土壤稱為泥炭土 (Peat)，屬於高有機質土壤，多孔輕量，壓縮性極高，土木建築構造物之基礎及工程材料上均無應用價值。如所含植物纖維經氧化分解而成膠體狀極細之顆粒者，稱為腐植土 (Muck)。

【1——19】試述土壤之有機物含量測定方法。

【解答】

土壤所含有之有機物重量之檢驗，得分成灼熱減量法及重鉻酸試驗法兩種。

(1) 灼熱減量法係使用攝氏 110° 至 120° 烘乾後之粒徑 2 mm 以下之土壤 2 g 左右，置放於坩堝內，復於攝氏 700° 至 800° 火爐內灼熱 3~4 小時。

設 W_1 = 坩堝重量 (g)

W_2 = 試樣重量 + 坩堝重量 (g)

W_3 = 灼熱後之試樣重量 + 坩堝重量 (g)

得

$$\text{有機物含量} = \frac{W_2 - W_3}{W_2 - W_1} \times 100 (\%)$$

(2) 重鉻酸試驗法係將一定量之 $K_2Cr_2O_7$ 添加試樣內，利用 95% 以上之 H_2SO_4 使有機物氧化分解，未呈反應之 $K_2Cr_2O_7$ 部份以 $FeSO_4(NH_4)_2SO_4 \cdot 6H_2O$ 滴定後，求出有機物氧化時所消耗之 $K_2Cr_2O_7$ 量而計算有機物含量。

設 S = 決定 $FeSO_4(NH_4)_2SO_4 \cdot 6H_2O$ 溶液之濃度時，滴定所需要之

$FeSO_4(NH_4)_2SO_4 \cdot 6H_2O$ 溶液量 (cc)

T = 決定 $K_2Cr_2O_7$ 溶液消耗量時，所需要之 $FeSO_4(NH_4)_2SO_4 \cdot 6H_2O$ 之溶液量 (cc)

W_s = 試樣重量 (g)

得

$$\text{有機物含量} = \frac{(S - T) \times 26.8}{SW_s} (\%)$$

【1——20】試述臺灣省各種土壤之有機物含量百分比。

【解答】

臺灣省各種土壤之有機物含量，多者達 5%，如臺北盆地及宜蘭平原之灰岩質土壤，少者不及 1%，如臺南附近海岸之鹽鹼質土壤。臺灣省北部之土壤有機物含量常高於南部之土壤，近山地區之土壤有機物含量高於近海地區之土壤。如由中部山地向海岸平原以垂直分佈言之，土壤之有機物含量隨地勢高度而增加，平原地區之平均有機物含量為 2.4%，臺地及盆地地區為 3.3%，高山草原及森林地區則為 7.0%。臺灣省各種土壤之有機物含量百分比如表 1—20 所示。

表 1—20 臺灣省各種土壤之有機物含量百分比

土 種	壤 別	灰 岩 質 土 壤	洪 積 層 土 壤	砂 岩 質 頁 岩 質 粘 板 岩 質 } 土 壤	玄 武 岩 質 土 壤
有 機 物 含 量 百 分 比 (%)		5.03	2.01	1.05~1.70	0.94

【1—21】何謂二氧化矽質？何謂氫氧化鋁質？試申述之。

【解答】

二氧化矽質及氫氧化鋁質均為粘土礦物之基本構造。二氧化矽質 (Silica Sheet) 係四個氧原子 (如結構需平衡，可以氫氧原子代替) 圍繞中心矽原子之四面體，經其頂點結合六邊形網狀之無限連鎖所成，如圖 1—21 (a) 所示，通常以記號△表示之。

氫氧化鋁質 (Gibbsite Sheet) 係六個氫氧原子圍繞中心鋁原子 (或鎂、鐵原子) 之八面體，經六邊形平面網狀組織所成，如圖 1—21 (b) 所示，通常以記號□表示之。

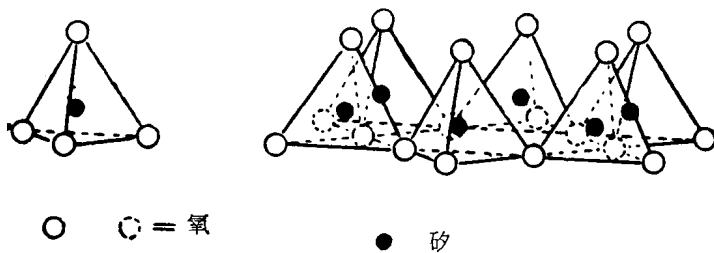


圖 1—21 (a) 四面體及二氧化矽質

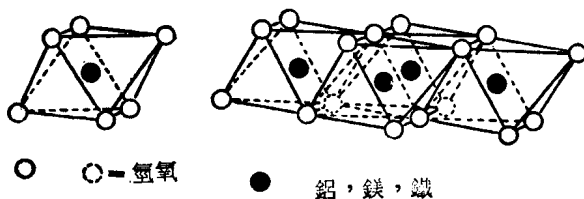


圖 1—21 (b) 八面體及氫氧化鋁質

【1—22】試述粘土礦物之種類及特性。

【解答】

粘土礦物 (Clay Mineral) 具備一定之晶體形狀，解理甚完全，晶系為斜方晶系或單斜晶系。其形狀為扁平層疊式，均由多數構造單位所疊成，甚似雲母片之排列。據 Kerr 及 Houser 之研究，粘土礦物共有十二種，最重要者為高嶺石，蒙特石及伊來石三種。

高嶺石 (Kaolinite) 係高嶺石類中最普遍而重要之礦物，以相接之二氧化矽頁及氫氧化鋁頁之構造單位構成如圖 1—22 (a) 所示，因二氧化矽頁氧原子及氫氧化鋁頁氧原子之氫結合所疊成，結合力較大，甚穩定，水份無法進入頁間，不發生回脹或收縮作用。

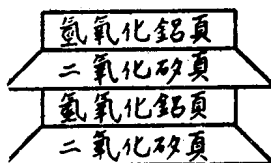


圖 1—22 (a) 高嶺石之構造單位

蒙特石 (Montmorillonite) 係蒙特石類中最普遍而重要之礦物，以氫氧化鋁頁為中間，上下為二氧化矽頁之構造單位所造成如圖 1—22 (b) 所示，結合力必需端賴交換性陽離子。蒙特石之結合力較弱而水份易進入頁間，呈現高收縮性及高回脹性。

伊來石 (Illite) 係伊來石類中最普遍之礦物，除二氧化矽頁內之矽原子 (20%左右) 通常被鋁原子代替，使其殘餘之陰電荷大於蒙特石構造單位之陰電荷外，其基本構造單位與蒙特石之構造單位類似。伊來石之陰電荷大致被非交換性之鉀離子 (K^+) 平衡而成為伊來石晶體如圖 1—22 (c) 所示。伊來石之非交換性鉀離子之結合力較高嶺石構造單位之氫結合力小，但較蒙特石構造單位之交換性陽離子之結合力甚大，而頁間之水可移動，不產生回脹現象。

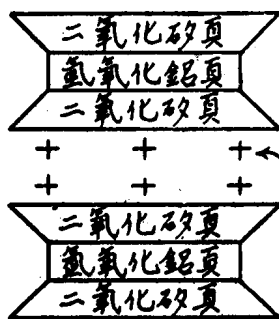


圖 1—22 (b) 蒙特石之構造單位

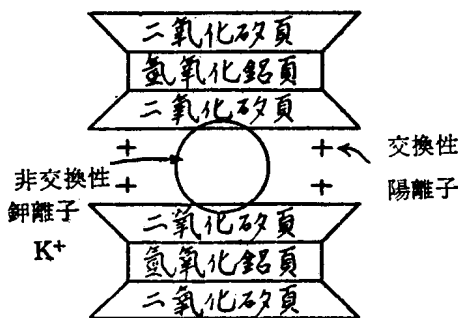


圖 1—22 (c) 伊來石之構造單位