

工程土力學

Engineering Soil Mechanics

原著者：*JAN J. TUMA and*
M. ABDEL-HADY

譯述者：趙國華 陳煌銘

校訂者：何智武 褚炳麟

(三訂版)

發行者 科技圖書股份有限公司

**engineering
soil
mechanics**

工 程



原作者序

本書將工程土力學的主要知識及工具作了有系統及扼要的說明，實能作為一般，大學及技術學院工程土力學教科書之用。

本書分三大部份共計十章。第一部份，包括土壤形成之研究、分類方法、質流理論及土壤水份和土壤壓密之探討。第二部份，包括三種，計土體分析、應力分析、強度分析與穩定分析。第三部分為研究土壤之冰凍作用。

為便利讀者研讀及查閱，本書在編排上具有下列幾個特色：

- (1) 每章分作三部份：理論、例題、及補充習題。
- (2) 理論部份，簡明地將各專門名詞給予定義及區別，并解說其原理、公式及實驗例證。對於特殊問題之探討及解決方法，本書也作了廣泛的討論。
- (3) 例題部份，包括定理之誘導與證明，以及實驗的例證與討論。
- (4) 補充問題部份，列舉一些有關本章內容之問題，作為演習之用。

由於本書的資料收集較為廣泛，如為授課時間所限，可將第三章質流莫式，第七章半空間分析、第八章應力張量概念，及第十章冰凍作用等，留作中級土力學講授。

在準備及編輯本書時，筆者等承受先前兩代的土力學者與基礎工程師們所發展之龐大知識始得完成。事實上對於建立實用而可靠資料的人們僅列出姓名（如德植基、加薩格蘭第、戴勞等）已感不足。故在書末附入各人有關詳細資料，以供參考而誌景仰之意。

J. J. 杜牧

M. 阿白台爾，赫台

AST-25/04

譯者序

三年前曾與李文勳教授爲中國工程師學會合譯 Scott 氏之「土壤力學與基礎」一書，在譯校者言中曾寫過下列一段「由於課程內容日新月異，故每隔五年必另換新書作教本，如此才能趕上時代不致落伍」等語。此書出版後暢銷一時重版再三，如就商業目光而言，此書尚可再候三年另出新書未遲。但在年初購得 J. J. Tuma 與 M. Abdel-Hody 教授合著之 Engineering soil mechanics 一書，深感興趣，以其編排別緻，綱舉目張極易瞭解，無艱難難明而使人困頓不前之感。其中列有簇新資料如質流模式 (rheological model)，半空間分析 (analysis of half-space)，應力張量 (stress tensor) 以及凍土作用 (frost action) 等，尙未見於任何中文書者，今則臚列雜陳堪推佳作。乃約門人陳煌銘君負責譯成初稿，繼由華擔任複校，舉凡詞句斟酌，詞意推考，巨細無遺，凡半年而書成。由於桃李之芬芳，筆者能在就衰之年尙有機會對學術界作最後之衝刺供獻，不復有髀肉復生之感，亦足以自慰矣。聊誌數言以爲序。

再本書在初譯時，曾請司徒銳文、李崇正、孫宗富、陳蓉妹、曾家興等同學代爲抄錄譯稿因而能提早出版，書此誌謝。

趙國華 六十四年青年節

工程土力學

目 錄

原作者序

譯者序

目 錄

第一章 形態論

第一節 緒 論	1
第二節 基礎材料之種類	2
第三節 基本性質	4
第四節 土壤結構	6
第五節 土壤稠度	8
例題解答	9
補充習題	21

第二章 分類

第一節 緒 論	25
第二節 地質及土壤學之分類	25
第三節 形態學之分類	26
第四節 用途上之分類	29
例題解答	36
補充問題	44

第三章 質流學

第一節 緒 論	47
第二節 基本模式	48
第三節 簡單組合模式	49
第四節 複合模式	52
第五節 轉置矩陣	54

例題解答	56
補充習題	70

第四章 土內靜止水

第一節 緒論	74
第二節 靜平衡法	76
第三節 能量法	78
第四節 土壤水份的靜效應	80
例題解答	82
補充問題	94

第五章 土內流動水

第一節 緒論	96
第二節 滲透性	99
第三節 滲流	102
第四節 水流之壓力效應	106
第五節 野外滲透試驗	107
例題解答	110
補充問題	131

第六章 體積變化

第一節 緒論	136
第二節 壓縮率	137
第三節 壓密	141
第四節 壓密質流學	145
例題解答	146
補充問題	165

第七章 應力分析

第一節 緒論	170
第二節 分析方法	174
第三節 影響函數	178
第四節 形狀函數	179

第五節	紐麥克影響圖	184
	例題解答	186
	補充問題	200
第八章 強度分析		
第一節	三軸態	203
第二節	兩軸態	206
第三節	強度理論及實驗	209
第四節	非黏性土壤之強度	210
第五節	黏性土壤之強度	212
	例題解答	214
	補充問題	237
第九章 穩定分析		
第一節	緒論	242
第二節	力間作用	243
第三節	承載穩定	244
第四節	邊坡穩定	248
	例題解答	253
	補充問題	280
第十章 冰凍作用		
第一節	緒論	286
第二節	溫度層次圖	287
第三節	冰凍透進因數	288
第四節	冰凍透進作用	292
第五節	冰凍透進分析	293
	例題解答	295
	補充問題	311
附錄一 各章參考書目錄		
附錄二 符號解釋		

第一章 形態論

1

第一節 緒論

主旨

地殼 (earth) 是由岩石 (rocks) 及土壤 (soils) 所組成。後者是由岩石經過一聯串風化作用，分解而成的顆粒所組成，包含有機質、水分、氣體、和細菌。有系統地探討岩石及土壤性質的學問，稱為岩石力學及土壤力學等。如果關連到工程上的應用，則稱為工程岩石力學 (engineering rock mechanics) 及工程土壤力學 (engineering soil mechanics)。雖然岩石及土壤有很多用途，但主要還是用來作為基礎 (foundation) 及營造材料 (construction materials)。

分析

本書專門研究作為基礎及土工的土壤之穩定度、硬度、及強度的分析。並利用數據、圖表及實驗等方式來幫助分析。

由於土壤力學是由固體、流體、及氣體等應用力學之延伸而成立的一門科學。依據下列各種原理作為分析的基礎：

2 工程土力學

1. 靜力 (static) 及動力 (dynamic) 平衡原理。
2. 脫節之相容性 (compatibility) 原理。
3. 能量不減及消散 (dissipation) 原理。
4. 因果之本構律 (constitutive law)。(由實驗導出)。乃係說明載重與變形間的關係。

在本書研究範圍內，上述各項原理，僅涉及其基本分析模式 (model) 之性質，並將一些問題予以理想化以利學習。

第二節 基礎材料之種類

基礎之功能

結構物 (structure) (房屋、橋、擋土牆、路面等) 乃是為了承載荷重及抗拒外力而設計的機構體。為達此目的，結構物必須經由能傳遞並吸收外力 (由體積變化或由自重而產生) 的媒介體 (如基礎) 所支撐。分析及預測此種能力 (或不能勝任)，乃是工程土力學的最大目標。

外視分類

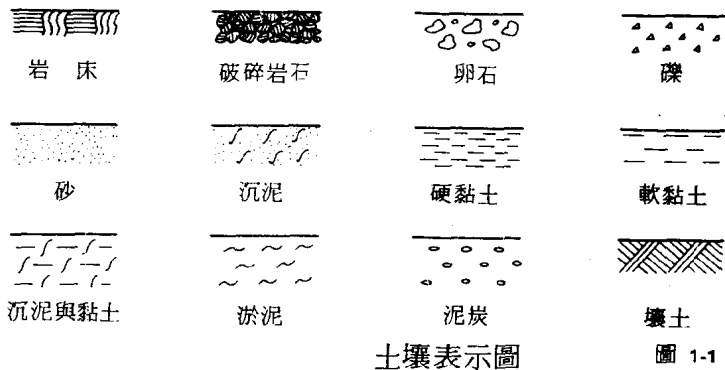
欲達成上述目的，基礎材料的檢定是絕對而且必須的步驟。為了方便起見，基礎材料大體上由觀察而直接辨認者，可分為下列幾類：

1. 岩床 (bedrock) 及鑛脈岩 (ledge rock)，係分佈於其發源處為不可分裂、強硬、及顯明的岩石，而且不摻雜質在內。
2. 粉碎或破碎岩石，乃為土壤和岩床間過渡層的物質，包括大小碎石。而其裂縫內通常摻雜其他較軟的物質。
3. 卵石，包括大卵石 (boulders)，卵石 (cobbles)，小卵石 (pebbles)。大卵石為破碎或圓形之岩石，最大粒徑大於 10 in (250 mm)。卵石之粒徑為 2 in (50 mm) 至 10 in (250 mm) 之間。而小卵石之粒徑則在 4 mm 至 2 in (50 mm) 之間。大卵石可單獨存在或與其他兩種卵石及砂土等摻雜一起。
4. 礫 (gravels)，細礫 (pea gravel)，係由岩床分裂而成囊狀或片帶層的岩石。其大小約為 2 mm 至 4 in (100 mm)。細礫之粒徑，則在 2 mm 至 1/4 in (6 mm)。
5. 砂 (sand)，是由 0.05 ~ 2.00 mm 之小圓石粒所構成。砂，一般可分為三類：細砂 (fine sand) (徑 0.05 ~ 0.20 mm)，中砂 (median sand) (徑 0.20 ~ 0.60 mm)，粗砂 (coarse sand) (徑 0.60 ~ 2.00 mm)。

6. 沉泥 (silt)，是細小顆粒 (粉狀) 的岩石，大小在 0.005 至 0.05 mm 間。有些小到無法用肉眼辨認。
 7. 粘土 (clay)，是由小於 0.005 mm 之微細顆粒的無機物所構成。粘土可分為軟粘土、中等粘土、硬粘土，一般依其含水量與壓密度而定 (見第六章)。由多次沖積構成的粘土，稱為灰質粘土 (adobe) 而由微細滑脂性的粘土構成的則稱為膠質粘土 (gumbo)。
 8. 間隔土 (hardpan)，乃是砂、礫、與沉泥或黏土混合而成的一種高密度土壤。生硝土 (Caliche) 又稱智利硝土，是礫、砂、沉泥含有硝鹽土層，經過蒸發作用結合而成。
 9. 壠姆 (loam)，是砂、沉泥、或粘土等與有機物混合而成，此種土壤，通常稱為頂層土壤 (top soil)。
 10. 黃土 (loess)，顆粒小於 0.05 mm，由風吹移積的細粒土壤。
- 其他不適於作基礎材料的土壤，計有沼泥 (muck)，是一種黏土和水形成的混合物。泥炭 (peat)，是一種含有未完全分解的有機土壤。另外還有火山灰土 (betonite)，是由細粒的火山灰所形成。

圖示法

雖然各種土壤的圖示法未完全一致，但圖 1-1 的圖示法，為大多數工程師所採用。



土壤中之固體顆粒

上述各類土壤之固體顆粒的成因，大致可分為兩大類：由於岩石風化及有機物的分解而成。風化作用包括崩潰 (disintegration) (機械作用)，分解 (decomposition) (化學作用)，及溶化 (solution) (化學及

機械作用)等步驟,促使岩石碎裂成細顆粒料。有機分解是由於植物埋在土中而引起的分解作用與土交混。因此作用,產生了有機酸,所以有機分解可說是岩石風化過程的催化劑(catalyzer)。(習題 1.2 及 1.3)

岩石與黏土礦物

五種最主要的“岩石”礦物為矽(silicas)、長石(feldspars)、雲母(micas)、鎂鐵齊(ferromagnesian)、碳酸鹽(carbonates)。其中以矽的合成物為最普通的土壤固體。

三種最主要的“黏土”礦物,計有高嶺土(kaolinites)、蒙脫土(montmorillonites)、伊利土(illites)。這些粘土礦物,都是高度複雜的鋁矽化合物。(習題 1.5 與 1.6)

第三節 基本性質

三相之組合

土樣之體積 V_m 可由下式表示

$$V_m = V_s + V_v = V_s + V_w + V_g \quad (1-1)$$

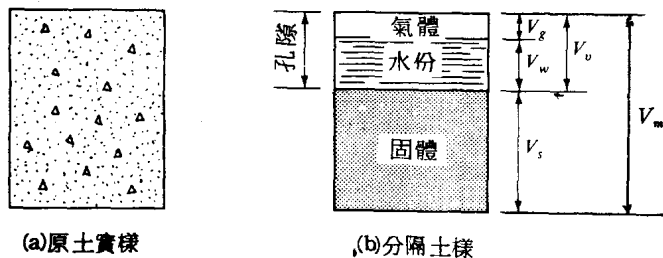
V_s = 固體顆粒體積

V_v = 孔隙體積

V_w = 水份體積

V_g = 氣體體積

(1-1)式所示之土壤體積的成份可由圖 1-2 表示之,稱為土塊圖(block diagram),(這種表示方法只是一種假想,因為所含之孔隙與固體均不能隔離的)。



(a)原土實樣

(b)分隔土樣

圖 1-2

三相土樣

同一土樣之重量 W_m ，可由下式表示之。

$$W_m = W_s + W_w + W_g \cong W_s + W_w \quad (1-2)$$

W_s = 固體顆粒重量

W_w = 水份重量

$W_g = 0$ = 氣體重量（可以略計）

體積間關係

由圖 1-2，可導出下列三種體積比——孔隙率（porosity），孔隙比（void ratio），及飽和度（degree of saturation）。

孔隙率 n ，為孔隙體積 V_v 和總體積 V_m 之比。

$$n = \frac{V_v}{V_m} \quad (1-3)$$

孔隙比 e ，為孔隙體積 V_v 和固體積 V_s 之比。

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{n}{1-n} \quad (1-4)$$

飽和度 S ，為水份體積 V_w 和孔隙體積 V_v 之比。

$$S = \frac{V_w}{V_v} \quad (1-5)$$

由〔（1-3）、（1-4）、（1-5）〕式之關係，可知 e 為無因次係數而 n 和 S 均以百分比表示之。（見習題 1.7 與 1.8）。

重量間關係

下列三個名詞，常用以表示土樣的重量——單位重（unit weight）、比重（specific gravity）、含水量（water content）。

單位重 γ_m ，乃為單位體積的土重；為總重量 W_m 和總體積 V_m 之比值。又稱為密度（density）。

$$\gamma_m = \frac{W_m}{V_m} \quad (1-6)$$

以上的關係具有一般性。設例如下

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}, \quad \gamma_w = \frac{W_w}{V_w}, \quad \gamma_d = \frac{W_s}{V_m} \quad (1-7)$$

γ_s = 固體顆粒單位重

γ_w = 水量單位重

γ_d = 乾土單位重 (乾密度)

比重 G_m ，是土樣重量和同體積在溫度 4°C 時的蒸餾水重之比值。

$$G_m = \frac{W_m}{V_m \gamma_0} = \frac{\gamma_m}{\gamma_0} \quad (1-8)$$

γ_0 ：蒸餾水在 4°C 時之單位重。

同理

$$G_s = \frac{W_s}{V_s \gamma_0} = \frac{\gamma_s}{\gamma_0} \quad G_w = \frac{W_w}{V_w \gamma_0} = \frac{\gamma_w}{\gamma_0} \quad (1-9)$$

上式中 G_s 為固體顆粒比重，而 G_w 為水之比重。

含水量 w 是土樣內之水重量 W_w 和其固體重量 W_s 之比值。

$$w = \frac{W_w}{W_s} \quad (1-10)$$

由 [(1-6) ~ (1-10)] 式可知； γ 之單位為， lb/ft^3 (或 t/m^3)
 G 為無因次比， w 以百分比表示 (見習題 1.9, 1.10, 1.11)。單位重與比重在公制中的數值是相同的，但在英制中是有差別的。

第四節 土壤結構

分類

土壤元素 (固體、水、氣體孔隙) 的排列狀態稱為土壤結構 (structure of soil)。顯然地，土壤排列法很多，下列的三種是較具代表性的：非黏性土壤 (cohesionless soil)、黏性土壤 (cohesive soil)、骨構土壤 (skeletal soil)。

非黏性土壤

非黏性土壤 (圖 1-3)，是由疏鬆或緊密的大顆粒土壤堆積結合而成。通常稱為單粒土壤 (single-grain soil) (如砂，礫)，其穩定度則和

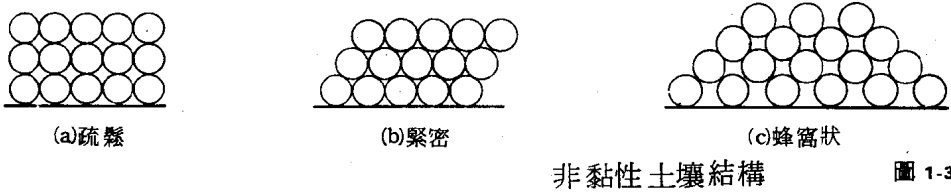


圖 1-3

密度有關。非黏性土壤的抗剪強度，是由於其顆粒間的摩擦而產生。

黏性土壤

黏性土壤（圖 1-4），係由黏土礦物所組成。在土壤內部形成了複雜

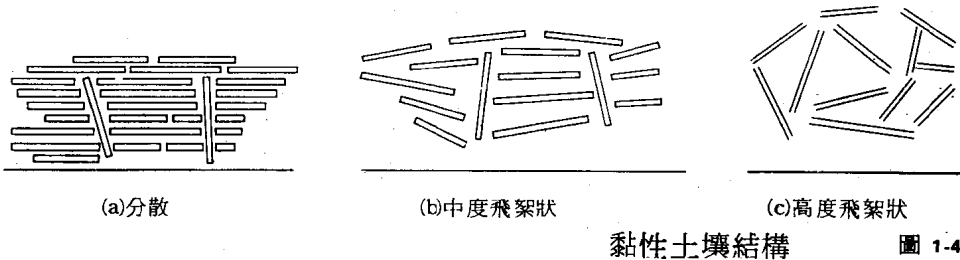
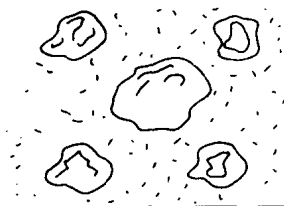


圖 1-4

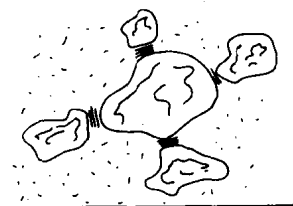
的力系（吸引力及排斥力），因而產生分散或作飛絮狀的排列。黏性土壤能在缺乏側壓力條件下供獻其剪力抵抗，一般可視為良好基層結構。

骨構土壤

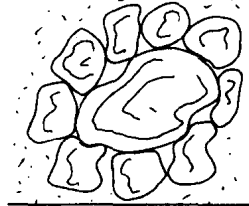
骨構土壤（圖 1-5），係由凝結力將大顆粒之膠料膠結，成一骨構體。普通具有三種組合形式之一式：母體構造（matrix structure），接面結合構造（contact-bound structure）及孔面結合構造（void-bound structure）。此種土壤之剪力強度及穩定性，係由骨構之性質，但以結合料之性質為主。



(a)母體構造



(b)接面結合構造



(c)孔面結合構造

圖 1-5 骨構土壤結構

第五節 土壤稠度

概念

土壤之稠度視情況而異。大致可分為液體 (liquid)，塑性體 (plastic) 及固體 (solid)。顯然地，此種定義是指細粒土壤而言，因其含水量能影響其稠度。但含水量並不能作為稠度指數，必須設有一定的界限。

阿太堡限度

土壤稠度通常由阿太堡氏制 (Atterberg's system) 來衡量。將土壤分為四態：液態、塑性態、半固態、及固態。如黏土等之細顆粒土壤，依含水量的不同而形成此四態。

1. 液限 (liquid limit)，液體狀態的土壤經過乾燥後，土壤達到某程度的稠度。在此程度內，土壤不再有液體的性質而具有塑性（即是承受連續載重時，很快發生變形但不脆裂，去重後亦不恢復原狀之性）。此時土壤內所含之水量謂之液限 (LL)。
2. 塑限 (plastic limit)，當土壤中水份繼續減少時，到了某一程度不再具塑性，若用手揉搓成直徑為 $1/8$ 吋 (3mm) 的土條能使其斷碎。此時土壤內所含之水量，稱為塑限 (PL)。
3. 縮限 (shrinkage limit)：含水量繼續減少，土壤體積隨著縮小，至某一程度時，土壤體積不再縮小，此時土壤內所含之水量，稱為縮限 (SL)。

指數性質

阿太堡限度之實際價值有限，但其對於土壤的鑑定及分類很有助益。有

三種指數是依據這種限度而定：

1. 塑性指數 (plasticity index) (PI)，為液限 (LL) 與塑限 (PL) 之差。
2. 縮限指數 (shrinkage index) (SI)，為塑限 (PL) 與縮限 (SL) 之差。
3. 液性指數 (liquidity index) (LI)，如下式所示。

$$(LI) = \frac{w - (PL)}{(LL) - (PL)} = \frac{w - (PL)}{(PI)} \quad (1-11)$$

若 $(PL) > w$ ，其值為負。 (LI) 值隨含水量之增加而變化，由塑限至液限，其值在 0.0 至 1.0 之間。(習題 1.10、1.11 至 1.12)。

將四種稠度，三種阿太堡限度，及兩種相關指數用表列出如表 1-1 所示：(習題 1.12 至 1.15)

阿太堡制，限度及指數

表 1-1

相	限度	指數
液體	← 液限 (LL) ← 塑限 (PL) ← 縮限 (SL)	← 塑性指數 (PI) $(PI) = (LL) - (PL)$
塑性體		
半固體		← 縮限指數 (SI) $(SI) = (PL) - (SL)$
固體		

例題

名詞之定義

1.1 試述土壤在工程上之定義，并與地質學之定義相比較。

就工程意義而言，土壤為礦物質顆粒之自然結合體，或不含有機質，可用簡單機械法分開，例如在水中攪動。土壤可視為疏鬆之沈積或殘留物，如碎石、砂、及黏土，或上述各物之混合體。地質學上認為，土壤乃是表層或頂層土壤受風化作用之有機物。而頂層土壤在工程築造前常須挖除。故兩者之定義，不可混淆。

1.2 試作風化作用之定義，與其所含的作用方式，并舉例言之。

答

風化作用，包含下列各種作用方式：

- (1)崩潰 (disintegration)，因物理作用而使岩石發生風化。例如：
 - (a)週期性之溫度變化 (periodical temperature change)，由於溫度變化，使岩石反復不絕受到壓縮及伸張應力而分解。在沙漠中，由於晝熱夜冷，溫度相差很大，是故此種作用特別顯著。
 - (b)冰凍和融解作用 (freezing and thawing)，岩石空隙中之水份，因結冰而膨脹。致使岩石受到拉力影響而碎裂。
 - (c)受植物之物理影響，與動物在岩石上活動之影響。
 - (2)分解 (decomposition)，乃指岩石因受化學作用而引起之風化，例如：
 - (a)氧化作用 (oxidation)，乃是氧離子和岩石中礦物質之作用。例如含有鐵質之岩石常易產生氧化作用。
 - (b)還元作用 (reduction)，乃是和氧化作用相反的作用。氧離子由岩石內之礦物質起析離作用。
 - (c)水化作用 (hydration)，乃為水內所含化合物與礦物質起之作用，和自由水所引起之崩潰不同。如，長石 (feldspar) 礦物，從花崗石 (granite) 中析離而成黏土礦物質高嶺土 (kaolinite)，乃為其中最重要之水化作用。
 - (3)溶解作用或碳化作用 (solution or carbonation)，由於含相當量的二氧化碳的水份，促使岩石物質發生溶解作用。此種作用，害處頗大。尤其在石灰岩區，表面水常含二氧化碳，更需多加注意。
- 以上各種風化方式，可能單獨發生，亦可能混合發生，視氣候狀況而定。

1.3 試述土壤內有機物質之成份，與其在工程上之特性

答

土壤內之有機物，係由植物或動物等有機物死後埋置土中，經過化學和細菌等作用而分解。在正常情況下，大都集中在土壤表面下 2 至 12 in (50 ~ 300 mm) 處。由工程觀點而論，由於有機物之多孔性結構 (spongy structure) 且含有成份軟弱之不良特性。當加載或含水量變化時，便發生相當大之體積變化。

有機質土壤有很高之自然含水量 (約為 100 ~ 500%)，其穩定度很低。成份內之酸素常引起土壤內水份起酸性反應，因而引起土壤內物質起腐蝕作用。故在施工前，必須將表層土壤內之有機物完全除去。

1.4 試作岩石礦物質定義，並列舉形成岩石之主要礦物質。

答

就地質學而言，“礦物”乃是自然形成之無機物質。具有均勻或易變之化學成份與物理性質。很多礦物質為雙元素或多元素化合物，但亦有少數