

大學用書

公路土壤學

陳孚華編著

正中書局印行

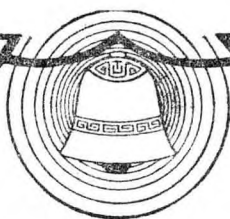
大學用書

公路土壤學

陳孚華編著



正中書局印行



版權所有
翻印必究

中華民國三十四年六月渝初版
中華民國三十六年七月滬三版

公路土壤學

全一冊 定價國幣六元九角
(外埠酌加運費匯費)

編	著	者	陳	孚	華	
發	行	人	吳	秉	常	
印	刷	所	正	中	書	局
發	行	所	正	中	書	局

(1942)

茅 序

曩嘗言，任何工程司之畢生事業，無一能與土壤絕緣者，而以土木工程司爲尤甚。一切工程皆賴此土壤之抵抗力，爲其最終支柱。故人類初有工程，土壤卽其對象。試思今日之世界，普遍致力於一物，投資最鉅，費工最多，有勝於土壤者乎。鐵路公路之土方，橋梁房屋之基礎，以及水利、隧道、溝渠、市政等土木工程，其占全部工程款、工期之最大百分數者皆有關土壤之消費也。凡一工程之是否艱難，規模之是否宏大，其衡量標準，亦土壤也。夫土壤本身價值乃至爲低微，幾可無償而得，以最賤之物，博最貴之工，最平凡之材料，成最偉大之建築，工程司對於任何事物之觀感，當無有更奇於土壤者也。

土壤雖爲常物，而內容之奧妙，卻無倫比，悉隨大自然之偶然變化而形成，其間綜錯複雜之關係，毫無規律可循。自古以來，天下之大，無兩地土壤確具有同質同性者。土壤自來如此，歷久未變，而工程司知之獨少，應付維艱，因而經濟上之損失，遂不可計算。土壤本爲最古之材料，以今日科學之進步，仍未能洞悉其竅要，尙須更新方法研究之，不可不謂工程史上之憾事。舉自第一次大戰以還，各國已有研究之動機，但時至今日，仍未能普遍的認識，則其事之不易亦屬顯然。惟其如此，我國工程師尤宜發揮力量，自動參加，以期有所樹建，此余之所以大聲疾呼吾國工程界人士及時努力邁進者也。

土壤工程之研究，爲一新興之學科，在吾國尤爲重要，無待詞費。舉凡名詞之釐訂，中外學說之介紹，啓蒙書籍之刊行等皆爲刻不容緩之舉。幸中國土壤工程學會不久成立，來日方長，必有長足之進展，願我同志共勉之。

陳孚華君與余在中國土壤工程學會籌備之初，傾蓋而遇，過從乃密，一日出其所著公路土壤之研究二卷示余，並欲余致一辭，余嘉其致力之勤，用心之苦，在日下缺乏此類專著之候，得此頗多裨益，故樂爲之序。

茅以昇

三十二年一月

自序

一九三三年著者負笈於美國密西根大學專習公路工程，當時美國公路界人士尙鮮有研究土壤力學者，至公路土壤學則方在萌芽時期。次年奧國土壤力學權威太沙基 (Terzaghi) 氏講學於麻省理工大學，一時研究土壤學之風乃盛。霍根道格勒 (C. A. Hogentogler)、客斯格蘭地 (Casagrande) 諸氏，在華盛頓阿靈吞 (Arlington) 成立公路研究實驗室專事土壤研究，南加利安那及渥海渥各州，繼起響應，並用新法鋪築實驗路。一九三六年萬國土壤學會復開大會於哈佛大學 (Harvard University)，公路土壤研究被列入重要部門。嗣後經學者不斷努力，公路工程司均一致承認土壤與公路工程有密切關係，不但各大學均將土壤學列入公路工程系必修科，即各公路局亦儘先採用土壤穩定法，修改施工細則，設計築路新工具。自馬克當 (Macadam) 發明碎石路面以來，公路路面建築原理至此始全部改革。

著者有鑒於國內公路日趨發展，技術方面不但應急起直追，且須合乎現代化，乃致力於公路土壤之研究，復徧歷各州公路局及華盛頓公路總局，一面實習研究，一面蒐集有關材料，以備介紹於國人。一九三六年秋復赴英、德、法、奧諸國考察其公路建築特點，及其實驗設備，計得圖表相片數百幀。旋因奉全國經濟委員會命令赴陝工作，忽忽就道，所有資料盡置於首都寓所，迨國都西遷，南京淪陷，此

部資料遂全部散失，數年所得，付之東流，殊為可惜。

抗戰以來，我國公路交通更加重要，公路運輸量，亦較戰前激增，過去所用之碎石路面已不能勝任，而鋪築高級路面之材料，復因交通不便無法輸入後方，不得不就地取材，採用穩定土壤法。著者歷年在西北西南各公路試用人工鋪築法修築水泥土壤，級配沙石等路面，亦稍有成效，於公餘之暇復搜集材料，著成此書。惟因缺乏參考資料，以前在國外所得者，又復失於南京，掛一漏萬，在所不免，尚望閱者指正。本書大部取材於霍根道格勒所著之土壤之工程性質 (Engineering Property of Soil) 及何素之土壤力學 (Housel, Applied Soil Mechanics) 兩書。

本書原擬分為三篇：第一篇敘述土壤之性質及其基本實驗，使讀者對於土壤有正確之認識。第二篇分述上列之各種穩定土壤方法。第三篇論土壤力學，包括有應力分布，建築沉陷，坍方，護牆土壓等。此篇所論者雖均與公路工程有密切關係，然較之前二篇所論之關於路面問題則尚屬次要。復因各方敦促，未能久待，僅先將前二篇編訂成冊介紹於讀者，其餘一篇正在蒐集材料中，不日亦可成書，務請閱者諒之。

本書承交通部公路總局副總局長趙祖康君，唐山大學教授朱泰信君等敦促出版，復承正中書局慨允代印，附此鳴謝。

陳孚華識

民國三十三年八月

目 次

第一篇 土壤性質

第一章 土壤之原始	1
第一節 構成土壤之巖石	2
第二節 土壤構成之因素與方式	4
第二章 土壤之基本物理性	8
第一節 黏性	9
第二節 內阻力	12
第三節 毛細作用	15
第四節 可壓性	17
第五節 彈性	19
第三章 土壤之特性	21
第一節 土壤組織	21
第二節 土壤結構	25
第三節 土壤之化學成分	29

第一篇 土壤性質

第一章 土壤之原始

遠自有史以前，人類即已開始利用土壤(soil)為建築材料，吾人每日所接觸之物體，除空氣與水外，以與土壤之接觸最為密切。但近代工程學者對於鋼鐵、水泥、木材、磚石等均有深切之研究，而對於土壤則反鮮有注意者。無論何種建築，其最下層之承載者必為土壤，如土壤之工程性質未加以研究，則無論如何堅固之建築亦難保其安全。例如橋梁基礎之沉陷，房屋地腳之傾斜，堤壩之滲水，以及公路路面之破裂，均由土壤不穩定所致。而土壤之性質實較任何工程材料為複雜，在自然界中決難覓得兩處性質完全相同之土壤，即使相距僅有數尺，其性質亦可有重大差異。土壤有含有大量風化巖石者，有含有腐敗有機物者，有含有矽藻(diatom)體礦物者，更有含有其他化學物質者。此外土壤中所含水分之多寡又復各不相同，千變萬化，未可以簡單之公式概括表出之。故研究公路土壤學時，斷不可只觀察一種或數種土壤之行爲，而冒然斷定全部土壤之性質。必須考察試驗若干種之土壤，詳加比較，反覆推斷，而後方可得到合理之結論。

地質學家以地殼(earth crust)為巖石(rock)所成；巖石之固結部分稱為基巖(bed rock)，其表面鬆動部分，不論其深淺，概稱之為表巖(mantle rock)。在工程上“土壤”二字係指表巖而言。是土

壤所包括之範圍至廣，一般以爲土壤與巖石係兩種不同之物體，其實其中界限甚微，土壤爲巖石所蛻變而成，其形狀雖異，其性質則一也。

土壤之構成可分爲固體、氣體與液體三部。空氣所占之體積視土壤之壓實度 (compactness) 而變，在虛鬆之土壤空隙可多至 70%，或 75%，在緊實之土壤有

時僅占 15% 或 20%。液體所占之體積變化亦大，少時僅占極小百分數，多時則全部土壤空隙 (void) 可被水充滿。至於土壤中固體部分則可分爲無機物 (mineral) 與有機物 (organic) 二部，如圖 1。土壤中有機物爲巖石分化之重要因素，但在工程上除偶然公路建築遇有腐

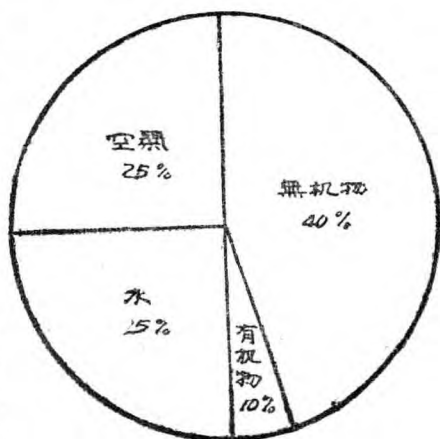


圖 1. 土壤之構成

泥土 (muck) 或沼澤地，對於有機物應加注意外，可不必多加研究。無機物部分則大半爲礦物顆粒 (mineral particles)，及巖石分化而成之碎礫。此部無機物爲構成土壤最重要之一部。改變此部成分即改變土壤之性質，同時工程人員對於土壤研究亦以此部爲出發點。

第一節 構成土壤之巖石

研究土壤學之前對於構成土壤之巖石，應先有認識。關於此部

研究，大都屬於地質學範圍之內；土壤學家對於地質學雖不必有高深之研究，但對於普通地質常識，如巖石之鑑別，巖石風化之原因等，則不可不具。同時土壤學又不可與地質學混為一談；地質學家對於土壤之研究未必對於工程司有用，以地質學眼光所解釋之土壤種種現象亦未必合乎土壤學之立場，此為學者所不可不注意者。

按地質學說，巖石可分為三種，即火成巖 (igneous rock)、沈積巖 (sedimentary rock) 及變質巖 (metamorphic rock)。此三種巖石中最常見者有下列十三種，此十三種巖石實包括有所有巖石四分之三。土壤學者若能鑑別此數種巖石，則已敷普通應用矣。

表 1.

火 成 巖	沈 積 巖	變 質 巖
花崗巖 (granite)	石灰巖 (limestone)	大理石 (marble)
正長巖 (syentite)	白雲巖 (dolomite)	片 巖 (schist)
閃綠巖 (diorite)	頁 巖 (shale)	板 巖 (slate)
玄武巖 (basalt)	砂 巖 (sandstone)	石英巖 (quartzite)
	礫 巖 (conglomerate)	

火成巖之特點在具有結晶構造，塊狀 (massive) 生層，同時無顯着之層理 (stratification)。但因巖石流動，或其他原因所成之劈開面 (cleavage plane) 之存在則甚顯着。火成巖係由於地殼之無機物熔解後凝結而成，故其中含有各種巖石成分。

沈積巖係由於沈積物受化學作用，或壓力作用，或化學作用兼壓力作用而成。沈積巖多係在水中積成，故亦稱為水成巖。沈積巖之

特點在具有層理，且可由所構成之沈積物或膠結體 (cementing material) 鑑別其種類。例如礫巖可稱為膠結之礫石 (cemented gravel)，砂巖可稱為膠結之砂土，頁巖可稱為膠結之黏土。

變質巖在地質學上雖畫分為另一組，但其構造中之無機物與火成巖、沈積巖則無二致。變質巖係由於壓力、熱力或化學力施於火成巖或沈積巖上而成，故其性質一半視原始巖石之性質，一半視變質時之環境而定。例如砂巖之形成係由於矽石 (silica) 所起之化學變質沈積而成，若矽石繼續起變化，形成過度膠結物之砂巖，則不復稱為砂巖而稱為石英巖，換言之，即由沈積巖變為變質巖矣。

上述之各種巖石均為公路上所常見者。鑑別此種巖石不但可助學者知土壤之來源，且可助工程司選擇路面材料。

第二節 土壤構成之因素與方式

土壤構成之方式 (process) 可分為分解 (disintegration)、分化 (decomposition) 與搬動 (transportation) 三種；其構成之因素 (agency)，亦隨此三種而不同。茲分述如次：

分解 分解係一種機械作用，或可稱為物理作用。例如膨脹與收縮 (expansion and contraction)、落片現象 (exfoliation phenomena)、冰凍作用、風雨之磨蝕以及植物生長之力量，均足以分解巖石。歸納言之，分解巖石之因素不外氣候、風、水與冰四種。

(1) 氣候 氣候為使巖石變為土壤之重要因素。在夜冷晝熱之沙漠地域，氣溫變化過於劇烈，能使巖石發生巨量之收縮與膨脹，或外部破碎，或表面起落片。在氣溫變化不甚劇烈之地帶，則僅能影響

及巖石與空氣或水所起化學變化之速度，更能影響及植物之生殖及死亡週期。

(2)水 雨水為構成土壤之第二要素。雨水除磨蝕巖石外，尚有洗積與搬動土壤之作用。在地形崎嶇不平、斜坡急陡之地帶，水流速度過大，最易磨蝕沖刷地面土壤，使肥美田園一變而為荒蕪不毛之地。土壤磨蝕之程度與水之流速有直接關係，表 2 所列數字可供公路工程司設計邊溝或涵管之參考。

表 2.

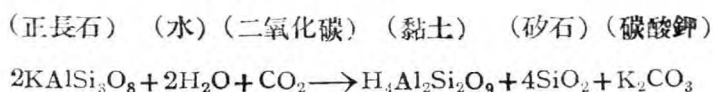
速 度 (呎/秒)	對於土壤磨蝕之程度
0.25	能移動黏土
0.50	能移動細砂
0.67	能移動栗子大小之砂粒
1.00	能沖刷小礫石
2.00	能沖刷直徑一吋左右之卵石
3.00	能沖刷雞子大小之石子

(3)風 風對於土壤之構成與水有同樣重要。在雨量稀少之地域，植物生長不易，土壤甚易被風力磨蝕，其甚者可造成砂丘 (sand dunes)，破壞建築，毀滅農村。

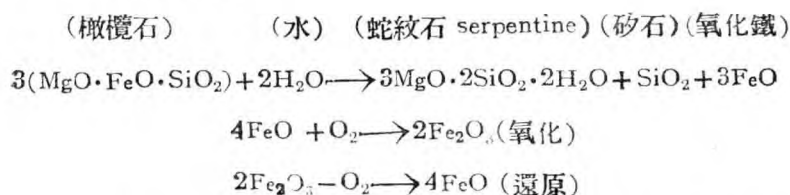
(4)冰 雨水存積於巖石之縫隙中，遇冷結成冰，其體積膨脹之力足以分裂巖石，碎片滾積於巖底，成錐形巖堆 (talus)。此種情形在氣候寒冷地帶懸崖之下常見之。錐形巖堆存積之碎片最宜於公路路面建築，因其尺寸適宜，質地往往堅固，為鋪築碎石路面最經濟之

材料。

分化 分化係一種化學作用，大都發生於已經分解之巖石，但有時亦發生於未經分解之堅固巖石，如地下水之分化地下巖石是也。分化作用最明顯者為水化 (hydration) 與脫水 (dehydration)，氧化 (oxidation) 與還原 (deoxidation)，溶解 (solution) 與沈澱 (deposition)，礫化 (carbonation) 與脫礫 (decarbonation) 等作用。巖石之化學成分至為複雜，故其化學反應式亦甚長。茲列其較簡單之正長石 (orthoclase) 之化學反應如下：



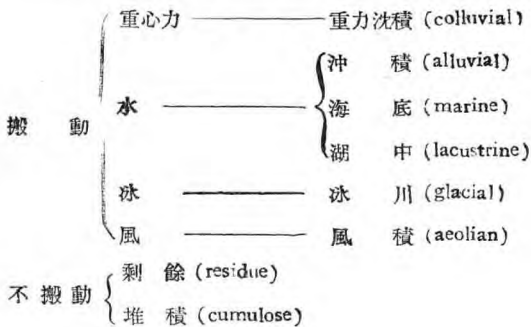
由式可知正長石分化後所成者為黏土質無機物、膠狀矽石與碳酸鉀。黏土質無機物不易溶解，故恆存積於一處；矽石與碳酸鉀雖較易溶解，但恆被黏土質無機物所吸收。更舉一例表示橄欖石 (olivine) 氧化後之反應：



氧化或還原作用發生之後，每於巖石上遺留有顯著之顏色變遷，故由巖石之顏色即可推斷其所起之化學變化，亦即由巖石演變為土壤之程度。一氧化鐵使土壤呈灰綠色，三氧化二鐵使土壤呈紅褐色。

微動 微動為構成土壤方式之一種，其演進之程序較分解與分

化作用均為顯著，搬動之結果可視所沈積物體之種類畫分如下：



重力沈積物發生於山嶺地帶，包括有錐形巖堆、坍方 (slides) 等。沖積物指河床沈積物而言，包括有沙壩 (sandbar)、沖積扇形地 (alluvial fans)、三角洲 (deltas) 等。海底沈積物指在靜水中之微細沈積物，包括有沈澱之無機物。湖中沈積物指在湖中沈積者，例如在美國五大湖旁之黏土。冰川沈積物發生於有冰川遺跡之地帶，包括有碎巖片 (till) 及雜樣巖石 (sorted rocks)。風積物最普通者有沙丘及黃土 (loess)，黃土係指微細之灰質粉沙 (calcareous silt) 而言，我國西北黃土層即此種沈積物所成，其厚度達數千呎。剩餘沈積物指分解後之碎石，始終未經移動者。堆積沈積物指泥炭 (peat) 與腐泥而言，其來源多由於植物腐敗分化而成，或海底動物屍體堆積而成，此種土壤含有大量有機物。

由上所述，可知土壤之由巖石演變而來之經過。普通所常見之土壤，其主要者不外礫石 (gravel)、粗沙 (coarse sand)、細沙 (fine sand)、粉沙 (silt) 與黏土 (clay) 等五種，茲分述如次：

(1) 礫石 造成礫石之巖石往往已被水流冲刷成圓形，小者大

如拳，謂之卵石(pebbles)；大者大如斗，謂之圓石(boulders)。石英為巖石中最堅固者，亦為礫石之主要成分，卵石與圓石因受水力磨蝕已久，其成分幾全屬石英。至於受磨蝕未久之礫石，其外表仍甚粗糙，並具有稜角，此種礫石則含有其他礦物如花崗巖、片巖、玄武巖等。

(2)粗沙 粗沙之成分往往與礫石相同，其顆粒亦已磨成圓形。

(3)細沙 細沙之表面恆較粗沙富於稜角，此並非因細沙所受水力之磨蝕作用較粗沙為少，乃因細沙之顆粒間具有一層薄水膜，足以保護沙粒，使之不致起磨蝕作用。

(4)粉沙 粉沙除顆粒較細沙為小外，其礦物成分與細沙相似，但有時粉沙係由腐敗之化學物演化而來。此種粉沙含有矽酸鹽(silicate)、鋁、鹼性土(alkaline earth)及氧化鐵等，有時粉沙亦可含有硅藻、浮石(pumice)或黃土等。

(5)黏土 土壤中之粗料(coarse material)往往由於石英、長石(feldspar)等演進而來，已如上述，黏土則幾乎全由化學風化(chemical weathering)之附產而來。以前學者認為黏土係非晶質材料(amorphous materials)，但最近研究結果，則已確定黏土為結晶體(crystalline)。凡富於塑性(plasticity)不穩定之黏土往往係扁平、鱗狀顆粒所組成。黏土與其他土壤粗料最大之區別在前者為土壤中能呈化學反應之部，而後者為土壤之不活動部分。

第二章 土壤之基本物理性

土壤之研究範圍雖廣，然土木工程司所須注意者，祇有其一部分，其關於農業、陶器業者，則出於土木工程司研究範圍之外矣。工程

上研究土壤之目的最重要為能預測土壤受壓力與應力(stress)後之行爲。欲預知土壤之行爲，必須對於土壤之性質有徹底之認識。在此應注意“性質”(property)與“特性”(characteristics)之不同。特性不過表示土壤在某種狀況下之可能行爲，但不能用數字正確表示行爲之程度。由性質或物理性(physical property)則可預知土壤在一種狀況下之確實行爲及行爲之程度。人類對於一種科學之研究，莫不對於其特性先有認識，然後進而研究其性質，土壤學亦如是；土壤之特性早已為一般所注意，而對於物理性加以研究則僅近十餘年之事。

土壤之特性包括有組織(texture)、結構(structure)、表面面積(surface area)、密度關係(density relation)、顏色及化學成分等，其詳細討論見第三章。本章所論為土壤之物理性，包括有黏性(cohesion)、可壓性(compressibility)、內阻力(internal friction)、承载力(bearing capacity)、彈性(elasticity)、塑性(plasticity)、黏度(viscosity)、體積變化(volume change)、毛細作用(capillarity)及滲透性(permeability)等九種。此九種物理性並非絕對不相同，其中不但有若干共同之性質，更有兩種性質可併為一種者。例如塑性與黏度均屬黏性；體積變化係屬於毛細作用。故綜合以上九種物理性可得五種基本物理性(basic physical properties)，即黏性、內阻力、毛細作用、可壓性及彈性。

第一節 黏性

土壤之黏性為其不受外部壓力影響時，土壤本身之團結力。普

通所謂黏性實具有二部：一部為真實黏性 (true cohesion)，係由於土壤本身分子吸引力所造成；另一部為外表黏性 (apparent cohesion)，係由於土壤含水之表面張力 (surface tension) 所造成。顆粒較大之土壤，其分子間引力遠不及其分子之質量 (mass)，同時其空隙間水分之表面張力甚微，故此種土壤之黏性甚小。反之，顆粒細小之土壤，其分子間引力較其分子之質量為大。顆粒愈小則引力愈大，黏力亦愈強；土壤中水分愈多，則其分子間隔愈遠，分子間之引力愈小，表面張力亦愈小，黏性亦隨之而減，至土壤變成液狀時，則黏性全失矣。但若土壤中含水過少，則其分子間無表面張力，分子間隔至近，黏性亦不大。土壤黏性最大時當在其分子週圍具薄層溼氣膜 (moisture film) 時。關於此點在第八章另論之。

上述之現象並不限於黏土質土壤，不過黏土之顆粒較小，其作用亦較顯著；例如潮溼之沙土可以圍成圓柱形，蓋沙粒間水分之表面張力所起之外表黏性足以黏結沙粒，保持其形狀不致散開。若將圓柱浸於水中，則分子間被大量水分隔離，表面張力全失，沙土亦立時失去其所保持之圓柱形。

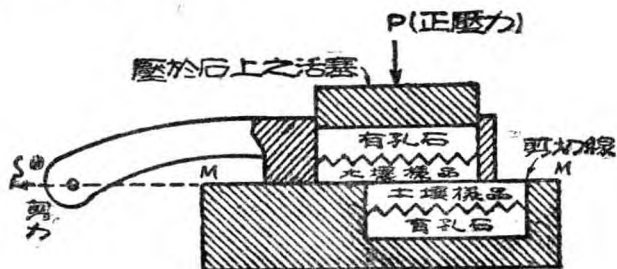


圖2. 剪力試驗儀

土壤之物理性如剛性 (rigidity)、黏度、塑性等均與黏性有連帶關係。剛性可稱為彈性固體 (elastic solid) 所具之高度黏性。黏度與塑性則可稱為低度黏性。黏性之程度可用抗剪力 (shearing resistance) 表之, 其試驗方法至為簡單, 如圖 2。土壤貯於兩片多孔石 (porous stone) 之間, 上加壓力。剪力分割土壤之面為 $M-M$ 。如是則土壤之抗剪力全在土壤之黏性與其內阻力, 前者之值與 $M-M$ 割面面積成正比例, 而與正壓力 N 不發生關係, 後者則與割面面積無干, 而與正壓力成正比例。

- 設 S = 剪力, 單位為公斤/平方公分, 或噸/平方呎;
 P = 正壓力, 單位為公斤/平方公分, 或噸/平方呎;
 C = 土壤之黏性, 單位為公斤/平方公分, 或噸/平方呎;
 θ = 內阻力角。

則
$$S = P \tan \theta + C.$$

沙土質土壤 S 與 P 之關係如圖 3, 虛線表示實際實驗結果, 簡單起見可用直線表示之; 即無黏性土壤,

$$S = P \tan \theta.$$

黏性雖與正壓力 P 無干, 但與實驗時

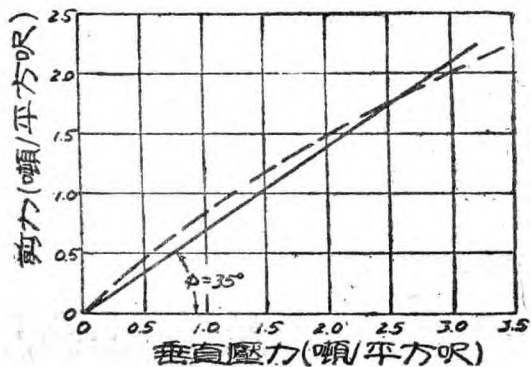


圖 3 無黏性土壤之剪力與壓力關係

土壤之凝實度 (degree of consolidation) 則有連帶關係, 如圖 4,

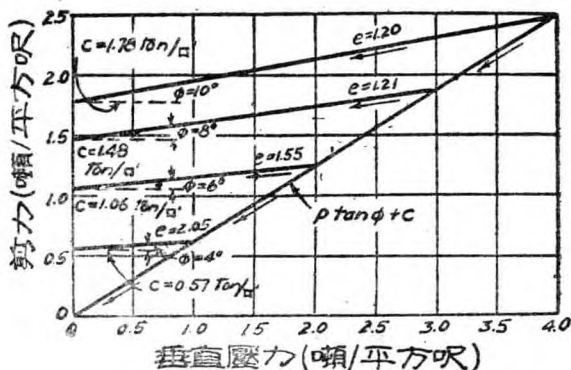


圖 4. 黏性土壤之剪力與壓力關係

試驗時用四種不同凝實度土壤樣品, 所施壓力為 4, 3, 2, 1 噸/平方呎, 每種樣品由零壓力遞增至最高壓力, 然後再遞減至零壓力, 惟曲線並不循原路返至座標中心, 其路線如圖中箭頭所示, 直線與縱座標相交距離即為 C 之值。

在 4 噸/平方呎壓力下, 土壤之剪力為 2.5 噸/平方呎, 壓力減至 3 噸/平方呎, 剪力為 2.33 噸/平方呎, 再減則為 2.15, 1.95 噸/平方呎, 直線與縱座標相交處為 1.78 噸/平方呎, 亦即土壤之黏性。

用法求得 C 與 θ 之值並非絕對正確, 蓋 $P \tan \theta + C$ 曲線並非直線, 惟其間區別之程度在公路土壤學應用上影響甚微, 在此略去不論。

第二節 內阻力

內阻力為土壤之第二基本物理性, 庫倫定律 (Coulomb's law)

稱“當兩種物體互相滑動時所生之摩擦力等於壓力乘摩擦係數”。摩擦係數等於 $\tan \theta$, θ 為內阻力角 (angle of internal friction)。土壤內阻力角之值可用下簡單試驗求得之。

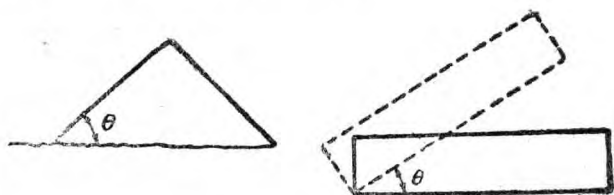


圖 5. 內阻力角簡單測法

將土壤堆成一錐形堆，則堆與平面所成之靜止角 (angle of repose) 即等於 θ 。或可盛土壤於一盒中，抬高盒之一端，至盒中土壤開始滑動時，盒與平面所成之角，即等於土壤之內阻力角，如圖 5。用此法求得 θ 之值雖欠精確，但試驗則甚簡便。所求得 θ 之值每次略異，雖無黏性沙土亦未能一致，蓋沙粒中之稜角與稜角間之位置不同，其摩擦力亦不同。

內阻力可分為二部：一部為顆粒與顆粒間之摩擦力，其值視土壤顆粒表面之光滑度而定。若表面粗糙，如新碎之石或尖銳之粗沙，其值較大，若海濱卵石與沖積沙，表面往往光滑，其值亦較小。一部為顆粒與顆粒間之連鎖力，其值則視土壤之壓實度而定。土壤顆粒接近愈密，則連鎖力愈大，顆粒愈難滑動，如圖 6。土壤中石子沙子與少量粉沙為使土壤具有內阻力之要素。

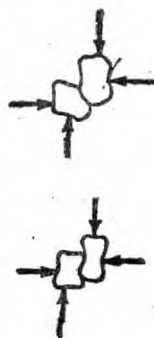


圖 6. 沙粒之連鎖力

內阻力之準確數值可用圖 7 之壓實儀測量之。圖之右半爲太沙基壓實儀 (Terzaghi's compression device), 左半爲美國公路局所改良設計之壓實儀, 壓實儀旋轉軸中之畫度螺旋適好與土壤旁面接

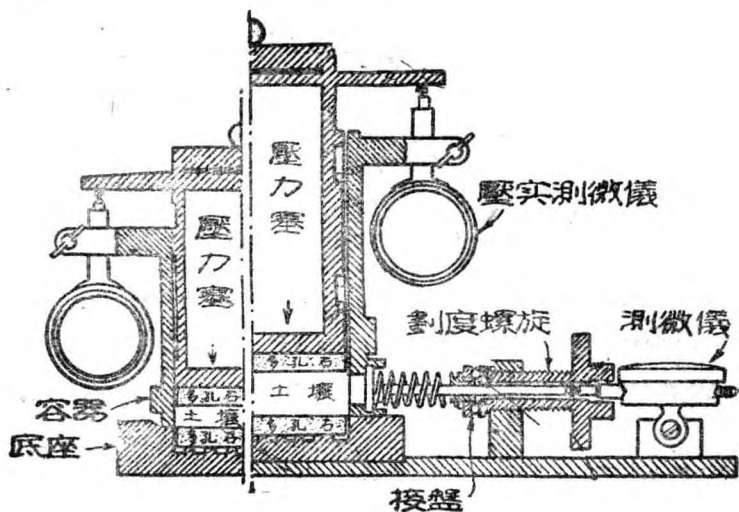


圖 7. 壓實儀

觸。加壓力於土壤時所引起之旁面壓力 (lateral thrust) 可由測微儀 (thrust dial) 讀出。太沙基利用摩氏圈 (Mohr's circle) 原理求得直接計算 θ 之公式如下:

$$\frac{P_m}{P} = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\theta}{2} \right);$$

式中 P_m = 旁面壓力,

P = 正壓力,

θ = 內阻力角.

各種土壤 θ 之值不相同，碎石與沙土混合料之值最高可至 34° ，最低為軟黏土，其值約 2° 。

第三節 毛細作用

毛細作用為土壤之第三種基本物理性，其功用在使土壤中之水分，向四面各方傳布，不因地心引力而改變其傳布方向，毛細作用之大小與毛細管 (capillary tube) 之直徑成反比例；因之，土壤之顆粒愈小，則其毛細作用亦愈大，毛細作用有關於工程建築至大，例如在建築土壩 (earth dam) 時，必須注意選擇毛細作用較小之土壤，以減少水分由壩之一面滲透至他面之量，其不能避免之毛細作用，亦應注意其方向，以便防止，公路鐵路路基建築對於毛細作用亦應注意，傍山路線，邊坡往往受山坡滲透水分之影響，小則破壞路面，大則引起嚴重坍方。

毛細作用與黏性有密切之關係，凡有黏性之土壤均具有毛細作用，但具有毛細作用之土壤未必有黏性，“液性限度”（參閱第五章）在 20 左右之土壤多係沙土質，其毛細作用甚微；液性限度在 20 以上之土壤，其毛細作用大增，蓋黏土之顆粒至微，毛細管直徑頗小，故其作用亦甚強，惟其蔓延率則甚緩，粉沙土之顆粒較黏土為大，其毛細作用亦較弱，但其蔓延率則甚大，故粉沙土之路基一受毛細作用之影響，立即失去其穩定性 (stability)。

毛細作用對於土壤有下列三種直接影響：

- (1) 土壤膨脹現象 土壤水分增加，則毛細管壓力減低。
- (2) 土壤收縮現象 土壤水分減少，則毛細管壓力增加。

(3) 霜凍後路基之霜脹現象(Heaving Phenomena) 土壤中毛細管被水分充滿後,若氣溫突降,則凝結為冰,體積增大,其力足以掀起路面。此種現象在北方寒冷地域,最為常見(詳論見第九章)。

土壤中之毛細作用至為複雜,土壤之組成與構造,土壤顆粒之排列,地下水之升降等,均足以影響毛細作用。故測量土壤之毛細作用頗為困難。滲透性與毛細作用有連帶關係,通常富於毛細作用之土壤則缺乏滲透性。研究土壤毛細作用,以由土壤滲透性入手,較為便利。用圖 8 之儀器可測得土壤之滲透性,亦即其毛細作用程度。毛細管實驗儀為客斯格蘭地(Arthur Casagrande)氏所發明。將碾碎之乾土樣品(dried soil sample)盛於玻璃管中,一端隔以細網,一端通過風管(air vent),將管置於水中,觀測水透入土壤之深度。設滲透

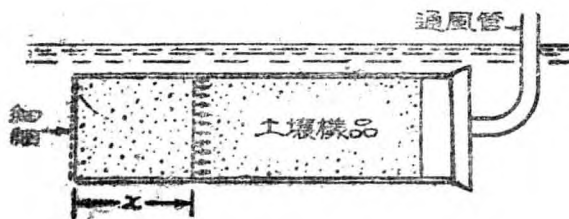


圖 8. 毛細作用試驗儀

之長度為 x , 經過之時間為 t , 則可由下列公式求得土壤之滲透係數(permeability coefficient), 亦即其毛細作用程度。

$$x^2 = t \sqrt{KF \frac{1+e}{e}}$$

式中 x = 滲透飽和土壤之長度，單位以公分計；

t = 時間，單位以分計；

K = 滲透係數；

e = 空隙比率 (void-ratio)，即土壤之固體體積與空隙體積之比；

F = 常數 (constant)，約等於 100,000。

其他關於毛細作用之敘述見第八章。

第四節 可壓性

可壓性為土壤之第四種基本物理性，其作用在使土壤在正壓力下凝實 (consolidate)，而同時不發生旁面流動 (lateral flow) 之現象。土壤內固體部分受壓力影響甚小，其所以能壓實者，以其本身具有

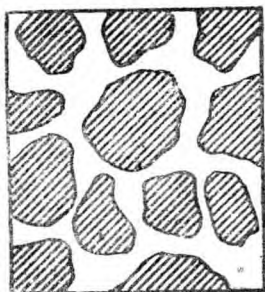


圖 9. 海綿狀黏土之顆粒分布

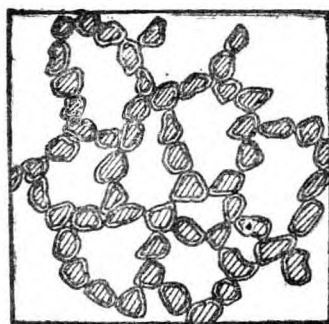


圖 10. 沙土之顆粒分布

無數空隙，空隙之面積恆遠大於土壤顆粒，故土壤可壓性之大小應視其空隙之多寡。顆粒狀土壤如沙土，凝實度最小，黏土與粉沙土均具有極大之凝實度。圖 9 表示海綿狀黏土之顆粒分布，其空隙最大

之黏土有占其全體積之 98% 者，圖 10 表示沙土之顆粒分布，其結構迥異於黏土，其空隙最多不過占全體積之 50%。

施壓力於沙土質土壤時，其凝實速度異常迅速，黏土則不然，有於壓力加後數十年尙未完全凝實者，蓋若土壤中之空隙完全為空氣，則受壓力後不難立時壓實，而事實上空隙中存有水分，壓實時必須先將水分排出，粗顆粒土壤水分排出甚易，故其凝實度亦速；細顆粒之土壤水分排出甚難，故其凝實度亦緩。

太沙基壓實儀為測量土壤壓實度之重要儀器，如圖 7，將少量未經驚動之土壤 (undisturbed soil) 樣品置於兩片多孔石間，加壓力於上面一片多孔石上，使土壤漸漸壓實，土壤含水則由兩片多孔石排出，壓實程度由兩個精確壓實測微儀 (compression dial) 讀出，繼續增加載重，則其最大載重必等於或大於土壤在其原地層時所受之壓力，因土壤載重不斷改變，故其各期密度亦不同，密度可以溼度或空隙比率表之，由實驗可求得載重與壓縮關係曲線，載重與膨脹關係曲線，太沙基壓實儀不但為測量土壤壓實度之重要儀器，略加改變亦可用為測量土壤之滲透性及剪力，為土壤實驗室所必備之儀器，太沙基用上述之儀器將沙土之壓力由每平方公分 0.5 公斤增至每平方公分 3 公斤，土壤之空隙不過減少 4%；用同法試驗黏土，則其空隙減至 50%。

各種土壤具有不同之可壓性，可用可壓性係數 (coefficient of compressibility) 表示之，可壓性係數為增加壓力每公分 (gram)，每平方公分土壤所減少之平均空隙比率。

設 a = 可壓性係數，

e_1 = 土壤在壓力 P_1 時之空隙比率,

e_2 = 土壤在壓力 P_2 時之空隙比率,

則

$$a = \frac{e_1 - e_2}{P_2 - P_1}.$$

例如實驗腐泥土時, $e_1 = 2.5$, $e_2 = 1.36$, $P_1 = 0.1766$ 噸/平方呎 (177 公分/平方公分), $P_2 = 5.336$ 噸/平方呎 (5.336 公分/平方公分),

$$a = \frac{2.50 - 1.36}{5.336 - 1.7} = 0.000221.$$

第五節 彈性

彈性為土壤之第五種基本物理性。如加壓力於土壤上, 土壤於荷重之週圍隆起, 荷重除去後, 土壤仍返至原來狀態者, 謂之有彈性之土壤。彈性之異於可壓性, 有如海綿之異於棉花; 若加壓力於充滿水分之海綿與棉花上, 當壓力除去後海綿立即恢復原狀, 棉花則保持其加壓力時狀況。海綿之所以反彈者, 以其纖維之膨脹性大於海綿含水之毛細作用, 故若將海綿浸於膠水中, 然後壓之, 則海綿失去其彈性, 蓋膠水之黏性勝過纖維之膨脹性。圖 11 表示彈性土壤與可壓性土壤受壓力之狀況。

彈性與膨脹係兩種不同物理性, 不可混為一談。荷重除去後土壤之反彈係由於土壤之分子具有彈性或海綿性, 如 A-5 組土壤即具有此種特性。荷重除去後土壤之膨脹係由於毛細作用吸收水分, 如 A-6, A-7 組土壤即具有此種特性。此種膨脹必須在土壤含水過多

時始能發生，且其方向每只限於直向 (vertical)；彈性則不然，不論

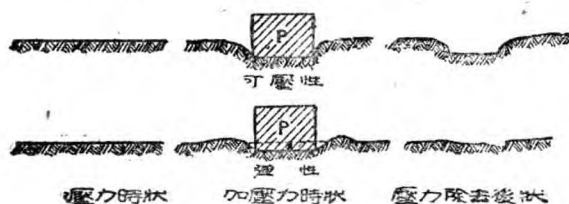


圖 11. 彈性土壤與可壓性土壤受壓力後之狀況

土壤之乾溼均能發生，彈性之方向亦不限於直向或旁向。

試驗土壤彈性可用圖 7 之太沙基土壤壓實儀。實驗法與壓實實驗相同，但與土壤反彈時使與水分隔離。太沙基氏將沙土之壓力由每平方公分 3 公斤減至每平方公分 0.5 公斤，則沙土中之空隙僅增加 1%；用同法試驗黏土，則其空隙增至 13%。可知黏土之彈性遠大於沙土。

土壤之彈性對於基礎工程 (foundation engineering) 並不重要。蓋地腳挖成後建築物往往立時砌起，且房屋、橋梁之活重 (live load) 往往遠不及其靜重 (dead load) 之大，故土壤之反彈作用不致影響及建築物之安全。在公路工程上則不然，路面之載重忽多忽少；重車行駛時，加以衝擊力 (impact)，路基所受之壓力數倍於平時狀況，因之在公路建築上土壤反彈作用極關重要。在路面建築之前，一般慣例，先將路基滾壓堅實，如路基土壤具有可壓性，則滾壓可增進路面之穩定，但如路基土壤具有彈性，則表面上土壤已被壓實，稍遇潮溼立起不平均之反彈作用，以致路面破裂，路基沈陷。故彈性土壤為公路建築時所應注意避免者。

以上不過就土壤之五種基本物理性與公路建築之關係作簡單之介紹，其詳細討論則見於土壤力學專書。

第三章 土壤之特性

前章對於土壤之基本物理性，已略有敘述，此章所論者為土壤之特性。吾人對於土壤雖每日有所接觸，但若不細心觀察，則不能引起注意。普通公路工程司描寫土壤僅限於“黑色土”、“紅色土”、“黃土”、“沙土”、“黏土”、“風化土”等，用此種不科學化之名詞往往誤解土壤之特性，有時引起嚴重誤會。工程司描寫土壤應練習使用正確之名詞，例如“某種土壤為粉沙土質組織，柱狀結構，具碎性與透水性，……。”如此則無論何人讀此描寫後對於此種土壤有一完全之觀念，不致含混。土壤之特性最重要者有組織、結構、化學成分及密度關係等。

第一節 土壤組織

土壤因自然界風化速度不同，加以外界混合作用，其組成含有種種大小不同之顆粒。土壤顆粒之大小及其分布情形，謂之土壤組織(soil texture)。美國公路局羅絲(A. C. Rose)氏按土壤顆粒大小分為十一種主要組織。

沙土(Sands) 含有 20% 以下之粉沙與黏土。

粉沙(Silts) 含有 20% 以下之沙土與黏土。

黏土(Clays) 含有 50% 以上之沙土與黏土混合料，或粉沙與黏土混合料，更含有 30% 以上之黏土。

壩母(Loams) 含有 50% 以上之沙土與黏土混合料，或粉沙

與黏土混合物，更含有 20% 以下之黏土。

黏土質墟塼(Clay Loams) 含有 50% 以上之沙土與黏土混合物，或粉沙與黏土混合物，更含有 20% 至 30% 之黏土。

粉沙質黏土墟塼(Silty Clay Loams) 含有 50% 以下之沙土與黏土混合物，更含有 20% 至 30% 之黏土。

粉沙質黏土(Silty Clays) 含有 50% 以下之沙土與黏土混合物，更含有 30% 至 50% 之黏土。

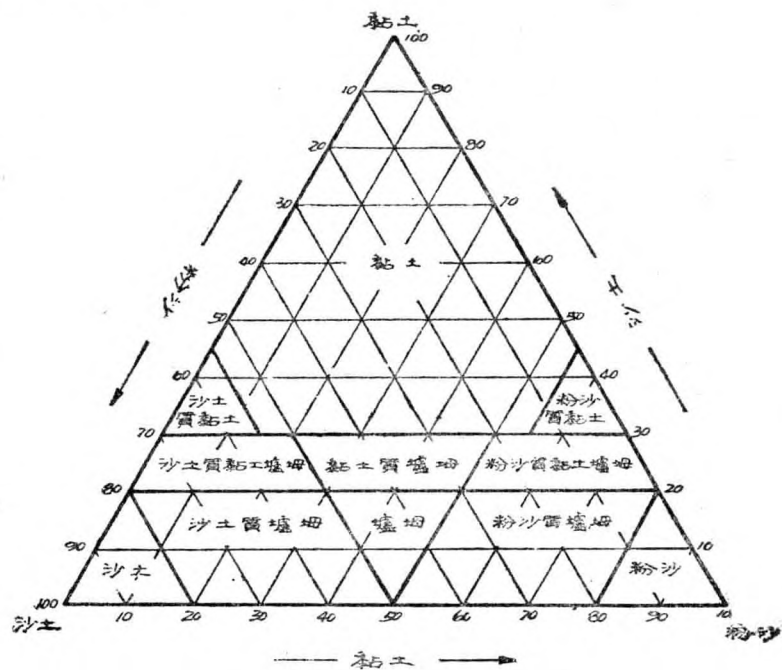


圖 12. 土壤組織分類表

沙土質壩姆(Sandy Loams) 含有 20% 至 50% 之粉沙與沙土混合料,更含有 20% 以下之黏土。

沙土質黏土壩姆(Sandy Clay Loams) 含有 50% 以下之粉沙與黏土混合料,更含有 20% 至 30% 之黏土。

沙土質黏土(Sandy Clays) 含有 50% 以下之粉沙與黏土混合料,更含有 30% 至 50% 之黏土。

粉沙質壩姆(Silty Loams) 含有 20% 至 50% 之沙土與黏土混合料,更含有 20% 以下之黏土。

圖 12 爲三角形圖解(triangular chart), 三角形之每角表示一種基本土壤; 其他各種土壤均由此三種土壤配合而成。第一角爲 100% 沙土, 第二角爲 100% 粉沙, 第三角爲 100% 黏土。其各組成分如表 3 所列:

表 3.

土壤組織類別	沙 土	粉 沙	黏 土
沙土	80 - 100	0 - 20	0 - 20
沙土質壩姆	50 - 80	0 - 50	0 - 20
沙土質黏土壩姆	50 - 80	0 - 30	20 - 30
沙土質黏土	50 - 70	0 - 20	30 - 50
壩姆	30 - 50	30 - 50	0 - 20
黏土質壩姆	20 - 50	20 - 50	20 - 30
粉沙	0 - 20	80 - 100	0 - 20
粉沙質壩姆	0 - 50	50 - 80	0 - 20
粉沙質黏土壩姆	0 - 30	50 - 80	20 - 30
粉沙質黏土	0 - 20	50 - 70	30 - 50
黏土	0 - 50	0 - 50	30 - 100

鑑別土壤之組織除在實驗室內用機械分析法(mechanical analysis)測定之,在野外(field)可將土壤樣品搓於兩指間,由指端感覺判斷其組織。茲將土壤組織簡易鑑別法述之如下:

沙土 土質為鬆散粒狀,顆粒歷歷可見。乾時以手團之,鬆手則立時散開。在潮溼時可團成模(mold),但若輕觸之,立即破碎。

沙土質壙姆 沙土質壙姆含有多量沙土,與相當數量之粉沙與黏土,稍具黏性。土壤之顆粒均能清歷察見。乾時可團成模,但甚易破碎。在溼時團成之模,若小心移動可不致破碎。

沙土與沙土質壙姆,均可按其顆粒之大小,分為粗沙、中沙(medium sand)、細沙及極細沙(very fine sand)四種。

壙姆 壙姆為沙土、粉沙與黏土均勻組成之混合料。觸手有融和含沙感覺(mellow gritty feeling),同時頗為柔軟,並稍具塑性。在乾時團成之模,小心移動,不致破碎;在潮溼時團成之模,則可任意移動,不致破碎。

粉沙質壙姆 粉沙質壙姆含有中量之細沙,少量之黏土,其餘過半數之顆粒均屬於粉沙。乾時表面呈塊狀,但甚易破碎。研碎之粉末觸手有柔軟末狀感覺。溼時甚易化於水中,乾時或潮溼時可團成模,並可任意移動,不致破碎。捏之於兩指之間,不能成連續帶狀(ribbon)。

黏土質壙姆 黏土質壙姆為細組織土壤。乾時易碎,碎塊堅硬;溼時捏之於兩指間則成薄帶狀,惟薄帶僅能支承本身重量,極易斷折。具塑性,可團成堅固之模,壓於掌中則成餅狀,仍不致破碎。

黏土 黏土為細組織土壤。乾時成極硬之塊狀,溼時捏於指間可

成柔軟之長條。

堅隔土 以上各種土壤如滲雜以相當數量之卵石或礫石，可稱爲堅隔土(gravelly or stony soil)。堅隔土仍可分爲沙土質礫土、黏土堅隔土等。

第二節 土壤結構

土壤之結構(soil structure)表示土壤顆粒之連接狀況，此不但可形容土壤顆粒排列形狀，並可形容其黏結之程度。土壤結構種類至多，由堅硬之硬土層(hardpan)至單粒結構(single grain structure)土壤，如沙土等，茲分述各種重要土壤結構如下：

曝乾結構(Adobe Structure) 土壤曝乾後裂成近似方形之塊狀，裂縫往往寬而深，每塊橫長約20至50公分。曝乾結構土壤往往含有多量膠體黏土。

非晶體結構(Amorphous Structure) 細組織土壤具有塊狀，顆粒排列不規則。非晶體結構土壤限於最細顆粒土壤，其顆粒不能察別。

塊狀結構(Cloddy Structure) 土壤所含石料具不規則稜角形，直徑在4公分以上。

柱狀結構(Columnar Structure) 土壤經天然排列而成相當整齊之柱狀，由垂直劈開線(cleavage line)互相分開，通常因橫向破裂而形成若干段落，其豎軸較橫軸爲長，柱頂皆作圓形。

密實結構(Dense Structure) 孔隙極微，無大孔隙或裂縫存在。近似非晶體結構。

粒狀結構(Granular Structure) 其石料顆粒大小各異,最大至 2 公分,其堅實度適中,而具有近似圓形。

片狀結構(Laminated Structure) 土壤經天然排列成爲極薄之片頁或層次,厚度小於 1 公厘,臥向或爲水平或與土壤面平行,堅實度通常由適中而至鬆軟。

細粒結構(Mealy Structure) 爲一種小塊狀結構,其堅實度由鬆軟至極軟,其直徑常小於 5 公厘。

積體結構(Massive Structure) 土壤顆粒不具有任何明顯排列狀況,亦屬於無結構土壤之一種,可以發現於任何結構之土壤中。

核狀結構(Nut Structure) 密實之石料,略作圓形,堅實度由堅硬至適中,其直徑由 1 公分至 4 公分。

硬土層(Hardpan) 一種堅密黏合之土壤堆積層,其外表有如巖石,不致被水軟化,硬土層名詞可應用於非黏合(not cemented)黏土層,亦可應用於乾時類似硬土層,但溼時軟化失去其巖石狀之層次,真正之硬土層係由於不易溶化之材料黏合而成,此層絕對可阻止雨水之滲透或植物根蒂之蔓延。

硬黏土層(Clay Pan) 係黏土所成之一種緊密堅硬之堆積,不易透水,而不黏結,浸之於水中則易軟化,硬黏土層亦可阻礙雨水之流動或植物根蒂之蔓延一如硬土層,硬土層與硬黏土層之區別,爲鑑別土壤時所應特別注意者。

無結構土壤(Structureless Soil) 土壤顆粒不具有任何顯著之構造式或排列狀況,此種結構亦可以單粒、積體或非晶體等名詞表示之。

與土壤結構有密切關係之土壤特性有堅實度與壓實度(consistency and compactness)二種。堅實度係表示土壤顆粒黏結力之大小及抵抗土壤所受形變(deformation)或破裂力量之程度。堅實度雖與結構有密切關係，且互相依賴，惟兩者意義則截然不同，不能混為一談。茲將各種堅實度分述如次：

脆性(Brittle) 土壤於乾燥後即發生尖銳清楚之破裂，擊破後所成之碎片堅硬清潔。

鬆性(Mellow) 土壤顆粒或石料，其黏着性質甚弱，易於破碎。堅固度不如碎性土壤，不易壓實。

塑性(Plastic) 易生形變而不致破碎，性柔，但富於黏結力，易成模形，有如麵團。

軟性(Soft) 用任何輕微力量均能使之破碎，或發生形變，捏之於手指間則立即破碎。

膠性(Sticky) 土壤當潮溼時易與他種材料或物體黏合。

固性(Firm) 足以抵抗所受破碎或形變力量。堅硬度不大，用手捏之可使破碎。

碎性(Friable) 略受輕微力量，即易破碎，易於拌和，能使之成為小塊或粒狀結構。

硬性(Hard) 足以抵抗所受破裂或形變力量，以手捏之不易使之破碎。

韌性(Tenacious) 土壤具有強大抵抗破裂力。土壤質量附着情況極強。

膠性與韌性二名詞應用時常易混合，在土壤學方面言之，前者

係指附着力 (adhesion) 而言，後者係指黏力而言，在解釋土壤性質時，兩者往往並用。

勁性(Stiff) 足以抵抗所受破裂或形變力量，土層具固性與韌性，近似於不透水性。

緊性(Tight) 係壓實、不透水、強韌之土層，常具塑性。

堅性(Tough) 足以抵抗所受破裂之力量，具有韌性，土層易於貫入，但難使之碎裂鬆散。

壓實度亦與土壤之結構有密切關係，壓實度為土壤對於貫入器 (penetration of pointed instrument) 所生反抗作用之大小。土壤之壓實程度往往以其密度與凝實度表示之，二者均可用試驗儀器測之，如第二章所述，茲將土壤壓實度分述如次：

不透水性 (Impervious) 抵抗雨水之透入力量極大，並能抵抗空氣與樹根之侵入，為不能貫穿 (impenetrable) 之土壤。惟在工地應用上，僅指水力侵入緩慢之土層，及能阻止或限制樹根蔓生之土層。

變硬性(Indurated) 結合成為極度堅硬之物體，雖在潮溼狀況下亦不能軟化或鬆散。如欲使其破碎，需力甚大，其性有如巖石。

鬆散性(Loose) 土壤顆粒或細料各自獨立，不相黏結，或黏結情況極弱，其空隙極大，對於抵抗破碎力量至小。

乾酪性(Cheesy) 略具彈性，可以受相當形變而不破裂，惟如欲使之破裂亦不困難，且需力不大。

壓實性(Compact) 土壤經壓實成為密實強固之物體，惟無結合度(cementation)，對於抵抗破碎及形變之力極大，有黏着力，且具

硬性。

第三節 土壤之化學成分

土壤化學成分之重要性已於第一章略有敘述。土壤之化學成分，雖不能在野外(field)求得之，但在野外可鑑別土壤之有機物、鹽性與鹼性土。所謂有機物係指含於土中之有機物，非積存於地面之有機物，其存在可由土壤表面之暗色而知，或於寒帶地域，可由土壤中之咖啡色土層而知。含化學成分最顯著之土壤有下列數種：

泥炭(Peat Soil) 含有大量有機物，富於纖維質，其中多植物遺跡，頗易鑑別。

腐泥土(Muck Soil) 包括腐爛之黑色有機物，及大量之礦質土壤物體，其成分極細，略含纖維。

樹葉層(Leave Mold) 堆積於土壤表面之腐爛有機物質，通常多為樹葉及草本植物之遺體。

鹼性土(Alkaline Soil) 含有過量鹼性食鹽之土壤。

鹽性土(Saline Soil) 含有過量之中性或非鹼性食鹽之土壤。

灰質土(Calcareous Soil) 土壤中含有適當數量之碳酸鈣，可以在弱性鹽酸(N/10)實驗時發生泡沫。此種土壤因其所含碳酸鈣之多寡，而有輕灰質(lightly calcareous)及重灰質(strongly calcareous)等各種名稱。

酸性土(Acid Soil) 土壤中缺乏鹽基性(base)，尤其缺乏鈣質，當用標準方法試驗時能起酸性反應(acid reaction)。在實地實驗時應用石蕊(litmus)或其他指示劑。酸性土壤之真正性質與最合

宜之試驗法迄無規定。酸性之程度則以“重性”(strongly)“輕性”(moderately)等名詞代表之。

土壤之顏色可表示土壤之排水狀況及土壤之化學成分。描寫土壤顏色純係一種形容詞。例如灰褐色土壤(grayish brown soil)乃係一種褐色土壤(brown soil)而略帶僅能辨識之淺薄灰色(grayish cast); 褐色土壤係一種灰色土壤而略帶薄褐色。其他顏色名稱解釋如下:

斑色(Mottled) 土壤主要顏色雜以一種或多種其他顏色之斑點(spots)或條紋(streaks)。此種斑色土壤,其中各種顏色並不混亂滲雜,而與普通土色有相當區別。在描寫顏色時土色及含有斑點之顏色須予分別標明。斑色之產生雖往往由於不良之排水(poor drainage)而起,但有時亦有例外。應用此項名詞時不可即以爲係指不良排水土壤而言,須求名符其實。

混合色(Marbled) 土壤中有兩種以上數量相等之顏色呈現,雖不滲雜,但相當混合。在此種混合色土壤中並不如斑色土壤之具有主要顏色(predominate color)。

點色(Spotted)、斑紋色(Speckled)、條紋色 此類名詞用以敘述土壤中各種顏色之分布情形。

第四節 密度關係

土壤係由於礦質顆粒、水與空氣三者組成,三者之比例各各不同,土壤之性質有時因之而變。土壤之比重(specific gravity)、密度(density)與孔隙等均隨此三種因素之比例而異。密度關係雖可用

數字表示，但工程司不過利用此種數字以解釋土壤物理性，而不能藉之直接測量物理性，故密度關係亦可列入土壤特性範圍內。

比重 物體每單位體積重量與水之每單位體積重量之比謂之比重。土壤學中所常用之比重名詞有絕對比重 (absolute specific gravity) 與外表比重 (apparent specific gravity) 或體積比重 (bulk specific gravity) 二種。絕對比重為固體或液體每單位體積重量與水之每單位體積重量之比；重量係在空氣中稱之，體積係在指定溫度時之體積。外表比重為有孔材料 (固體與孔隙) 每單位體積重量與水之每單位體積重量之比；重量係於空氣中稱之，體積係指定溫度時之體積。絕對比重在此簡稱為比重。土壤之比重大致相同，普通可用 2.65 代表一切土壤之比重。其測定法如次：

用 50 c. c. 比重瓶 (pycnometer) 一只，稱其重量，再滿盛蒸餾水，稱瓶與水之合重後，將水倒貯於另一瓶中。取土壤樣品約 10 c. c. 於電爐中烘乾後置入比重瓶中，加蒸餾水半瓶，搖動瓶身，使水與土壤混合均勻。用微火熱瓶底使土壤中空氣逸去，然後俟其冷後加滿瓶中之水，稱土壤與水及瓶之合重，則土壤之比重可由下式求得之：

$$\text{比重} = \frac{c}{b+c-d}$$

式中 b = 瓶與水 (在 25°C) 之合重，

c = 爐內烘乾土壤重減去收溼含水*重量，

d = 瓶及土壤與水 (在 25°C) 之合重。

*參閱第六章第二節。

體積比重又可分為乾體積比重(dry bulk specific gravity)與溼體積比重(wet bulk specific gravity)兩種。前者係在土壤空隙內無水時之比重，後者係在土壤空隙內充滿水分時之比重。茲以公式表之如下：

- 設 w_o = 土壤之乾重，
 w = 土壤之溼重，
 V = 土壤之溼體積，
 V_v = 土壤之空隙體積，
 V_s = 土壤之固體體積(除去收溼含水)，
 G_o = 乾體積比重，
 G_B = 溼體積比重，
 G = 比重。

則

$$G = \frac{w_o}{V_s},$$

$$G_o = \frac{w_o}{V} = \frac{V_s \times G}{V},$$

$$G_B = \frac{w}{V} = \frac{V_s \times G + V_v \times 1}{V}.$$

密度 土壤之密度在 C.G.S. 制，其值與土壤比重相等，蓋每立方公分之水在 C.G.S. 制重為一公分。在 F.P.S. 制則為比重 62.4 倍。土壤之密度亦因土壤之空隙之不同分為絕對密度 乾體積密度與溼體積密度等。

空隙比率 為土壤空隙體積與土壤固體體積之比，亦即土壤空

隙體積與其顆粒之絕對體積之比。

設 e = 空隙比率，

V_v = 土壤中空隙體積，

V_s = 土壤中顆粒之絕對體積，

則

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

如圖 13 所示。

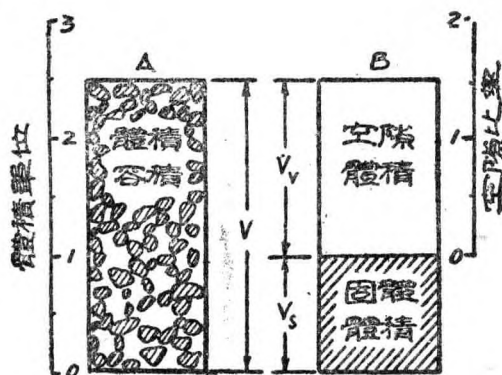


圖 13. 土壤中空隙體積與固體體積

如土壤顆粒之絕對體積不變，則空隙比率因土壤之壓實程度與含水多寡而變。

設 w = 含水百分數，以土壤乾重表之，

G = 土壤之比重，

則

$$w = \frac{\text{水之公分重}}{\text{土壤固體之公分重}} \times 100;$$

而一立方公分水重一公分，故土壤固體部分一立方公分之重為 G 公

分.

故

$$w = \frac{\text{水之立方公分容積}}{G \times \text{固體部分之立方公分容積}} \times 100$$

$$= \frac{V_v}{G \times V_s} \times 100.$$

$$e = \frac{w}{100} \times G.$$

表 4 所列為各種土壤在液性限度時*之空隙比率。

表 4.

土壤種類	液性限度時 空隙比率	土壤種類	液性限度時 空隙比率
沙土	9.54	硅藻	3.19
粉沙	0.71	雲母	3.44
有機物	2.00	膠體	8.18
黏土	2.65		

孔度 土壤之孔度 (porosity) 為其空隙之體積, 以土壤全部體積表之, 以公式表之, 孔度 P 為

$$P = \frac{V_v}{V_s + V_v} \times 100$$

$$= \frac{\frac{V_v}{V_s}}{\frac{V_s}{V_s} + \frac{V_v}{V_s}} \times 100$$

*參閱第五章。

$$= \frac{e}{1+e} \times 100.$$

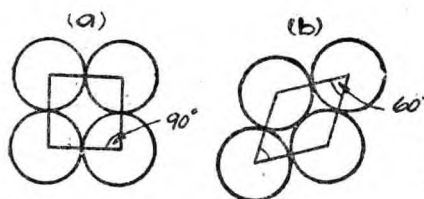


圖 14. 土壤顆粒排列之關係

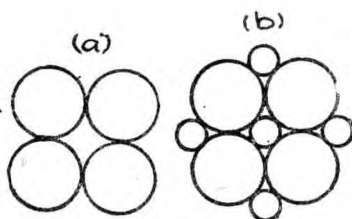


圖 15. 土壤顆粒級配之關係

土壤孔度之大小、多寡，視土壤顆粒之排列，顆粒之式樣，及各種不同尺寸顆粒之比例而變。圖 14(a) 為土壤顆粒最鬆之排列法，(b) 為緊密之排列法。圖 15 表示級配與土

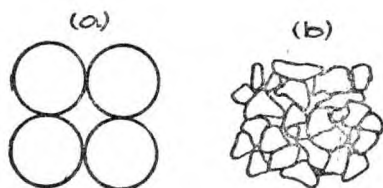


圖 16. 土壤顆粒式樣之關係

壤孔度之關係，如顆粒尺寸一律，其孔度最大如(a)所示。(b)為兩種大小之顆粒，其孔度較小。圖 16 表示顆粒式樣與孔度之關係，圓形顆粒較易壓實，稜角形者較難。方形之顆粒又較扁平者易於壓緊。如所有顆粒之尺寸均屬一律，則其孔度並不因顆粒之大小而變；換言之，一定容積內大顆粒者之孔度與小顆粒者相同。普通土壤之孔度在 50% 以上。

以上所述土壤密度關係，如比重、密度、空隙比率、孔度等均有相互關係，茲舉例說明如次：

設有腐泥土一種，其比重 $G = 2.71$ ，固體體積 $V_s = 1.0$ ，空隙總

積 $V_v = 1.5$ (參閱圖 13.)，

則 空隙比率 $e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{1.5}{1.0} = 1.5$;

孔度 $P = \frac{e}{1+e} \times 100 = \frac{1.5}{2.5} \times 100 = 60\%$;

充滿空隙所需之水 $w = \frac{100e}{G} = \frac{150}{2.71} = 55.4\%$;

空隙比率 $e = \frac{Gw}{100} = \frac{2.71 \times 55.4}{100} = 1.5$;

絕對密度 $D_s = 2.71$ (C.G.S. 制)，

$$D_s = 2.71 \times 62.4 = 169.1 \text{ (F.P.S. 制)};$$

乾體積比重 $G_o = \frac{V_s \times G}{V} = \frac{1.0 \times 2.71}{2.5} = 1.084$;

乾體積密度 $D_o = 1.084$ (C.G.S. 制)，

$$D_o = 1.084 \times 62.4 = 67.64 \text{ (F.P.S. 制)};$$

溼體積比重 $G_B = \frac{V_s \times G + V_v \times 1}{V}$

$$= \frac{1.0 \times 2.71 + 1.5 \times 1}{2.5} = 1.684;$$

溼體積密度 $D_B = 1.684$ (C.G.S. 制)，

$$D_B = 1.684 \times 62.4 = 105.1 \text{ (F.P.S. 制)}.$$

第四章 土壤測量

在建築新路或改善老路之前，對於路基土壤 (subgrade soil) 應有充分認識，此種認識一方面固賴工程司之經驗，一方面則有藉於土壤測量 (soil survey)。土壤測量有關於全路經濟甚為重大，例如公路測量定線時，若有土壤測量紀錄以為設計參考，則可避免路線經過不適宜於建築路基之地帶，或不穩定之土壤，易於發生坍方之土壤。不然，若於建築完成後發現種種不妥當情形，再加以防護或改線，則所費往往浩大。又設計路面厚度時，應先明瞭路基土壤之性質，始能求得最經濟之厚度；此又必須有土壤測量以為設計之根據。其他如填土材料 (fill material) 之選擇，橫斷面之設計，水管涵洞之埋設地位，以及路基土壤之是否應加處治 (treatment) 等亦均有賴於土壤測量。

第一節 土壤斷面

土壤斷面為已受風化土壤之剖面，剖面中所受風化程度雖同，而其特性則不一。可按其層次，因其組織、結構、顏色、壓實度、結合度、化成分等分別誌明，繪製成圖，即為土壤斷面圖 (soil profile)。測量土壤斷面所用之主要工具為土鑽 (soil auger)，如圖 17 所示。

鑽探之間隔 因地形與縱斷面而變，普通為每四十公尺為一站 (station)。若地形平坦，則距離可酌增。若縱斷面變化急驟，則應在每四十公尺內加鑽探孔，以求正確結果。填土地段可不必鑽探，但若填土材料係取自借土坑 (borrow pit)，則應於借土處加以鑽探。

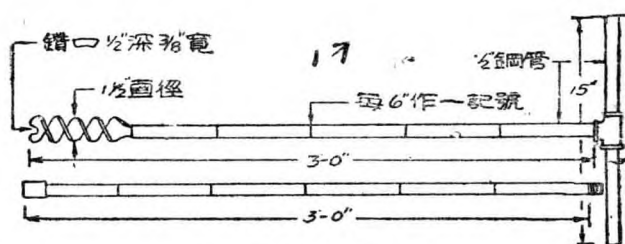


圖 17. 土鑽

鑽探之深度 至少應在設計線(grade line)下 1 公尺。若路基下土壤有數層，則鑽探之深度至少應達到邊溝下之第一層土壤。以斷定其是否具滲透性。在考察霜凍現象 (frost phenomena) 時，鑽探深度應達到霜凍層之平均厚度。遇有邊坡坍塌處，更應探求地下水 (ground water) 之地位，以便加設排水設備。

縱斷面圖之繪製 每次鑽探後，應選出重五磅左右之樣品，盛於

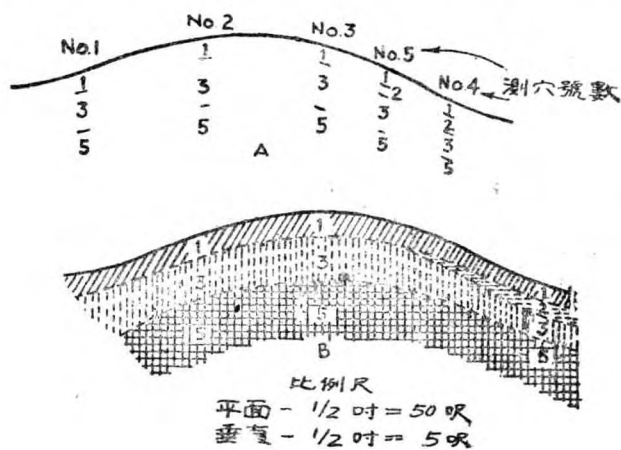


圖 18. 土壤縱斷面圖

緊密之布袋中，標明採取樣品地點之樁號，鑽探之深度，及其他應紀錄之事項。由鑽探之結果可繪製土壤斷面圖，如圖 18 所示。鑽探孔下之每層土壤用單數表之。例如在鑽探孔第一號下之土壤層次編為第 1, 3, 5 各層。此種編法目的在使臨近斷面內多出一層時編號便利。如在第 5 號孔，第二層可夾於第 1, 3 層間。並由此可知，在第 3 號與第 4 號鑽探孔間，必有一處為第二層土壤之終點，第 5 號新孔，即其所在處。

鑽測法採取樣品 採取樣品時如需要地面下較深之土壤樣品，則非土鑽所能及，可改用鑽測法(boring method)，即普通建築橋梁基礎時所用之鑽測法。法用直徑 4 吋之鐵管鑽入土中，同時用一直徑 2 吋管套於 4 吋管內，通水於其中，一面藉水力將土壤樣品沖刷而出，一面鑽探，並分別標誌沖出樣品種類與深度。

未經驚動土壤樣品之採取 若試驗時需要採取未經驚動之土壤樣品，則需要特別鑽探儀器。圖 19 為採取未經驚動土壤樣品儀之一種。先用 4 吋之鐵管鑽探至欲得土壤樣品處，除去管中土壤及一切雜物。然後用圖 19 之特製管降入管中，漸漸切入土中，土中之空氣與水由活塞逸去；至土壤充滿樣品管時，旋轉管身即可將管提出。

除去樣品管將兩端用蠟封固，以防止水分蒸發。連管送至試驗室，儲於潮溼室中備用。

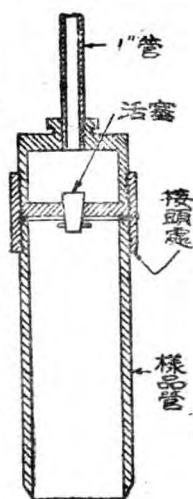


圖 19.
未經驚動土壤
樣品採取儀

圖 20 為設計新路時整個断面圖之式樣，除詳細註明排水設計，填土材料採取處及挖土深度等，尚附有下列說明：

第一層：紅褐色，鬆性粉沙質壤土，乾時具碎性，溼時具塑性。

第三層：灰褐色或斑灰色與銹褐色，粉沙質壤土，間有粉沙質黏土，具中度壓實度結構，壓實程度隨深度而增加，乾時具碎性，溼時具塑性，此層土壤雖具壓實結構，惟並不因之使滲透速度減低。

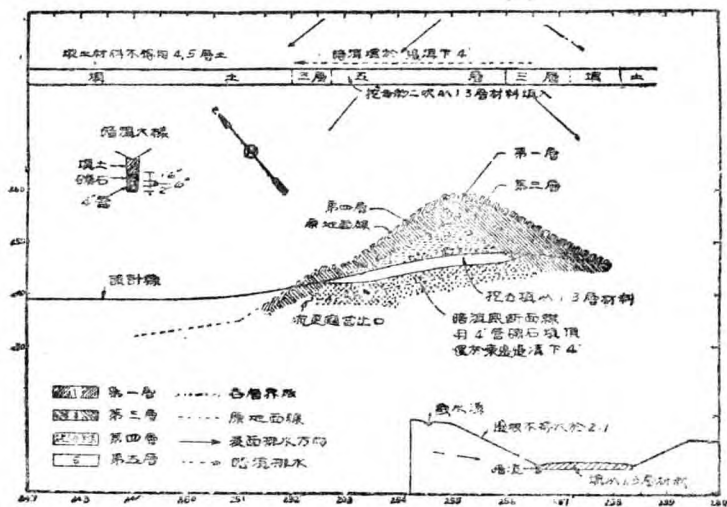


圖 20. 標準路基土壤断面測量圖

第四層：與第五層相似，惟含有大量 1/4 吋至 2 吋卵石，其中以 1 1/2 吋與 3/4 吋之尺寸者為最多。卵石之存在並不影響及土壤之行爲。乾時卵石四週之土壤發生裂縫，此層土壤尚包括有褐色或灰褐色壓實黏土，此部黏土係由於第一層及第五層轉變而來，乾時收縮頗烈。

第五層：斑藍灰色與銹褐色，具塑性、膠性之韌性黏土。係由稜形結構顆粒所組成，其表面呈光潤平滑狀。顆粒形狀不均一，甚易碾碎，如團成模形，能保持形狀不變。此層之表面3呎極為潮溼，其下則漸緊密，具塑性塊狀結構。藍灰色黏土減少水分向下流動之趨勢，但不能截止之。水分由土壤之劈開面侵入土中，因之產生有白色、黑色、銹褐色與血紅色等污點，滿布於此層中。乾時收縮甚劇，發生巨大裂紋。曝於風雨中，大塊土壤被水化為細小顆粒。此層土壤含有

表 5.

機 械 分 析								
編 號	層 次	較小於下列尺寸篩之百分數						
		2 mm	.5 mm	.25 mm	.05 mm	.005 mm	.001 mm	
16	1	100	100	98	90	28	19	
17	3	100	98	98	8	19	14	
18	4	53	49	44	42	19	13	
19	5	100	98	96	69	73	50	
通 過 0.5 mm 篩 顆 粒 之 物 理 性								
編 號	層 次	液性 限度	塑性 指數	收 縮		含水當量		組 別
				限	比	離心	實地	
16	1	88	16	23	1.7	2)	31	A-4
17	3	27	18	18	1.7	35	22	A-4
18	4	53	34	11	2.0	53*	33	A-7
19	5	101	71	14	1.9	93*	58	A-7

*水積現象。

*.8 號樣品，第四層含有粗礫石。

大量石灰。

第二部工作為化驗所採取之各層樣品，其結果如表 5 所列（表內各種物理性之解釋見第五章）。

由該段土壤之特性及其物理性觀察試驗結果，可舉出對於此段路基應加處治與應注意之各點如下：

- (1) 表面排水係由東至西。
- (2) 原地面線土壤承载力極強，可承载填土。
- (3) 第一層與第三層土壤係良好路基材料。
- (4) 加建排水設備，如平面、縱斷面、橫斷面所示。
- (5) 挖去第五層土壤深約二呎，更換以第一層及第三層材料。
- (6) 加設截水溝，如斷面圖所示。
- (7) 邊坡斜度不應大於 2 : 1。
- (8) 第四層與第五層所挖出之土，應全部棄去。
- (9) 路面設計時應加設縱向與橫向裂縫控制設備。

總以上所述，設計新路時均應依照上述辦法，按步就班，依次辦理，則不但可得穩固之路基，又可得堅實之路面。

第二節 探求材料

公路路面所需材料，主要者為沙、石兩種，惟沙、石產處其露於地面上者未必均在公路沿線附近，運距過遠則不合經濟原則，勢必就近尋覓隱藏於地下之沙、石產地，探求之方法以往多用鑽測法，最近發明之探求法有地阻力法(earth-resistivity)與聲傳布法(seismic method)二種，此二法費用甚小，收效迅速，為探求公路材料者所樂

用；前者可求出土壤碎石與基巖之所在地，後者僅能求出基巖之深度，但較前者為準確。茲略述二法如次：

地阻力法 將一定強度之電流經過兩電極，通過土壤中，如圖 21 之 C_1 與 C_2 。再於 P_1 與 P_2 二處量土壤之抵抗電阻力。 P_1 與 P_2 之位置分 C_1C_2 距離為三等分。此等分距離 A 稱為電極間隔 (electrode spacing)。變動電極間隔，則電阻力之讀數亦變。可用其關係繪成曲線，橫座標表示電極間隔，縱座標為電阻力 ρ ， $\rho = \frac{2\pi AE}{I}$ 。若曲線趨勢係向上，則表示深度增加電阻力增加，亦即表示土壤中有巖石、卵石層或其他高阻力層之存在。若曲線趨勢係平行或向下，表示土壤

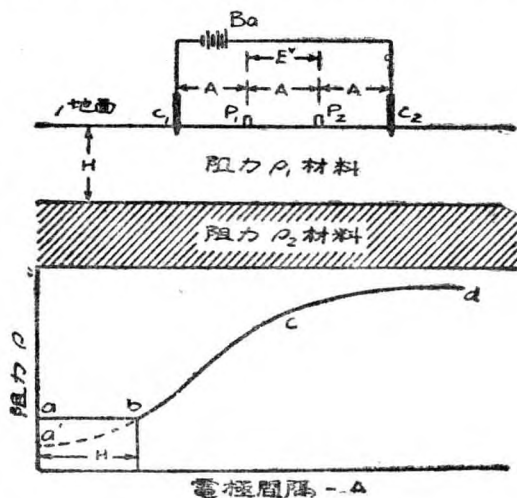


圖 21. 電阻力圖

係黏土質或其他。例如圖 21，地下第一層係具有阻力 ρ 之均勻材

料，其深度為 H ，在深度 H 以下材料之阻力較強。圖示在電極間隔不超過 H 時，曲線 ab 為一平行線；距離超過 H 時，曲線起急驟變化，忽然向上，表示 b 點為兩種不同阻力土壤相接處。因之可由圖中估計石料之產處。用此法不但可在平原區測得石廠 (quarry)，在新路建築時亦可利用以估計土石方成分。

聲傳布法 聲傳布法之原理係根據聲浪通過土壤與巖石速度

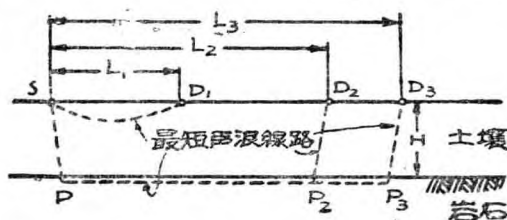


圖 22. 聲傳布之方向

之不同。聲浪通過非剛性材料 (non-rigid material) 如沙土、黏土、卵石等之速度為每秒 1,000 至 6,000 呎，通過剛性材料如巖石等之速度為每秒 16,000 至 20,000 呎。如圖 22，設在 S 處埋設炸藥，在 D_1, D_2 及 D_3 各點設聽聲儀 (detector)，當 S 處爆炸時所發之聲浪依次傳至 D_1, D_2 及 D_3 各聽聲儀上之電流計 (galvanometer)，爆炸開始至聲音傳到之時間係用電力照相 (photographic film) 紀錄，故可由電影片上之聲浪曲線，精確量出聲浪由 S 點傳至各聽聲儀之時間。

設 H 為土層之厚度，如 L_1 之距離較近，則聲浪由 S 出發，可不經過巖石層而直接到達 D_1 點，則其速度 V_0 為：

$$V_0 = \frac{L_1}{T_1}$$

聲浪到達 D, D_3 等較遠點時，則必須經過巖石層，其路徑為 SPP_2D_2 及 SPP_3D_3 ， SPP_2 為兩者所共同經過之路程，故聲浪經過巖石之速度 V_r 為：

$$V_r = \frac{L_3 - L_2}{T_3 - T_2}$$

假定 H 之深度遠小於 L_3 之長度，則可假定 PP_3 之距離等於 L_2 。由此可求得 H 之距離如下：

$$T_3 = \frac{H}{V_e} + \frac{L_2}{V_r} + \frac{H}{V_e} = \frac{2H}{V_e} + \frac{L_2}{V_r}$$

$$H = \frac{V_e T_3}{2} - \frac{V_e L_2}{V_r}$$

用電阻力法與聲傳布法，探測地下之蘊藏路面材料，較對於探測巖石層以為橋梁設計之根據，尤為重要。我國西北黃土層，公路沿線路面材料極感困難，運距遠至百餘公里，黃土層下是否蘊藏有礫石、碎石等路面材料，尚未得知。若能運用電阻力儀器當有相當成效也。

第五章 路基土壤常數之測定

路基土壤常數(soil constants)包括有液性限度(liquid limit)、塑性限度(plastic limit)、離心含水當量(centrifuge moisture equivalent)、野外含水當量(field moisture equivalent)及體積收縮(volumetric shrinkage)等測定。此數種常數均與土壤之物理性有直接關係，故測得其值後即可對該種土壤有正確之認識。試驗土壤常數時應備有表 6 所列之儀器，其中有必須備有者，有可暫以他法

代替者，全視實驗室設備力量而決定。

表 6.

名 稱	單 位	數 量	備 註
普 通 天 秤	具	1	靈敏度至 0.1 公分
精 確 天 秤*	具	1	靈敏度至 0.001 公分
陶 製 白 杵	套	1	杵之頭端裹以橡皮
鐵 製 白 杵	套	1	
樣 品 分 割 器*	具	1	
標 準 篩**	套	1	美國材料實驗所鑑定者
白 瓷 蒸 發 皿	具	2	直徑 4 吋
硬 刃 藥 刀	把	4	刃長約 3 吋，寬約 3/4 吋
白 鐵 盒	個	24	徑約 2 吋，附蓋子
液 性 限 度 儀*	具	1	客斯格蘭地氏儀(圖 28)
畫 溝 器	具	1	(圖 28)
特 製 毛 玻 璃*	塊	1	(圖 24)
滴 定 管	具	1	(50 c.c.)
離 心 器	具	1	包括古氏坩堝，砲耳杯等(圖 32)
電 爐	具	1	可維持 110°C 不變溫度
牛 乳 皿	個	4	圓形平底，直徑 1 1/2 吋，高 1/2 吋(圖 35)
特 製 玻 璃 杯	個	1	直徑約 2 吋，高約 1 吋，口端磨平
特 製 玻 璃 片	個	1	附有三支點(圖 35)
玻 璃 量 杯	個	2	25 c.c.
水 銀	c.c.	50	

*係不一定立即備有者。

**篩之孔徑與線徑規定如表 7。

表 7.

A.S.T.M. 鑑 定	篩 孔		線 徑	
	公 厘	吋	公 厘	吋
4	4.76	0.1870	1.27	0.0500
10	2.00	0.0787	0.76	0.0239
40	0.42	0.0165	0.25	0.0098
200	0.074	0.0029	0.053	0.0021

註: A.S.T.M. 係美國材料實驗所 (American Society of Testing Materials) 之簡寫。

上列各種儀器, 多易於置備, 普通認為土壤實驗室之設備至為複雜, 觀此表, 則知若僅欲測定土壤常數, 其設備亦至為簡單也。茲將各種土壤常數之測定法分述於下列各節。

第一節 土壤樣品之準備

實驗室收到工地送來之樣品 (sample) 後, 即晾乾於室內。用陶製臼杵 (pestle and mortar) 磨研土塊, 使其顆粒分開 (杵之頭端應包有橡皮以防損傷土壤顆粒), 三、四星期後, 土壤中之含水 (moisture) 不再蒸發而達於平衡 (equilibrium) 狀況。此時土壤稱為空氣晾乾土 (air dried soil)。用土壤分割器 (riffle sampler) 或用四分法 (quartering method) 分出一部分土壤以供實驗, 其數量如下列:

液性限度 30 公分 野外含水當量 10 公分
 塑性限度 15 公分 體積收縮 30 公分

離心含水當量……10公分 核對實驗…… 65公分

將晾乾土壤重量稱定後，用#10篩(sieve)濾過。其不能濾過者，應用杵臼研磨以分散其膠結處，再用#10篩濾過；其再不能通過者應用水洗去所有附着之細料，用火烘乾，稱其重量，此部土壤即為土壤之粗料(coarse material)，應再用#4篩分開，記載其留於篩上部分之重量。

兩次通過#10篩之細料(fine material)應使之混合均勻，用分割器分出115或65公分以備第六章機械分析實驗之用。其餘細料再用#40篩分開，棄去其留於篩上者，其濾過部分，則留作土壤常數實驗之用。

第二節 塑性指數之測定

由第二章第一節，知土壤黏性之由來係由於分子間之引力，故若增加土壤水分，使其分子間隔距離加大，則土壤之黏性減小。引用此原理可測定土壤之黏性。1905年奧特伯(Albert, Atterberg)氏首對此問題加以研究，奧氏稱當土壤之水分漸增，土壤之性質有兩番顯著之變化。乾燥之土壤於水分增加至某定量漸成塑狀(plastic state)，更加水至另一定量則成半流體狀(semi-fluid)，奧氏稱前者為塑性限度，後者為液性限度。塑性限度與液性限度之差即為塑性指數(plastic index)。茲分述其測定法如次：

塑性限度之測定 將土壤搓成 $1/8$ 吋徑之線條，而適生節節斷碎，此時土壤之含水量，以其烘乾土壤之百分數表示，即為該土壤之塑性限度。

將通過 #40 篩之空氣晾乾土壤(以下簡稱晾乾土)樣品約 15 公

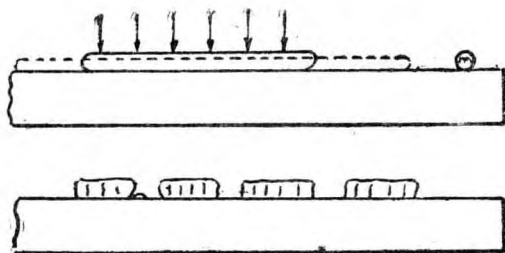


圖 23. 塑性限度之測定

分，置於白瓷蒸發皿 (porcelain evaporating dish) 中，徐徐加入清水，拌和至樣品能用手搓成球狀時為止，然後將搓成之土球置於毛玻璃 (ground glass) 片上，用掌心稍施壓力，慢慢揉搓，使其直徑漸漸縮小，至直徑為 $1/8$ 吋適生破碎現象，如圖 23。取該土壤樣品少許，置於兩片鍍面玻璃 (watch glass) 間，或白鐵盒中，稱其重量後，移入溫度 110°C 之電爐中，烘乾至其重量不變為止，移入氯化鈣乾燥器 (calcium chloride desiccator) 中，俟其冷後再稱之，記其重量。此時土壤重量稱為爐中烘乾土 (oven dried soil) (以下簡稱烘乾土)。塑性限度之值可用下式計算之：

$$\text{塑性限度 (P.L.)} = \frac{\text{土壤含水之重量}}{\text{烘乾土之重量}} \times 100.$$

用上述手測法試驗塑性限度，其差誤較大，因不易得正確 $1/8$ 吋之直徑，可改用特製毛玻璃，兩邊夾以 $1/8$ 吋鐵絲各一根，如圖 24。再用玻璃板代替掌心之揉搓，所得結果較為準確。

液性限度之測定 當輕擊容器十次後，容器內土壤樣品開始流

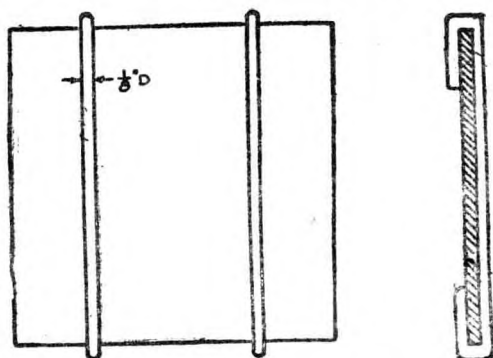


圖 24. 測塑性限度所用之玻璃片

動，此時土壤之含水量，以其烘乾土之百分率表之，即為該土壤之液性限度。以上之定義根據土壤之含水在液性限度時，其抗力甚微，但有一定數值，須用一定力量克服之。無論任何土壤之含水到達液性限度時，其抗翦力均相等。液性限度之值因土壤之性質而異。沙土最小，膠體(colloid)最大。圖 25 表示各種土壤之液性限度。

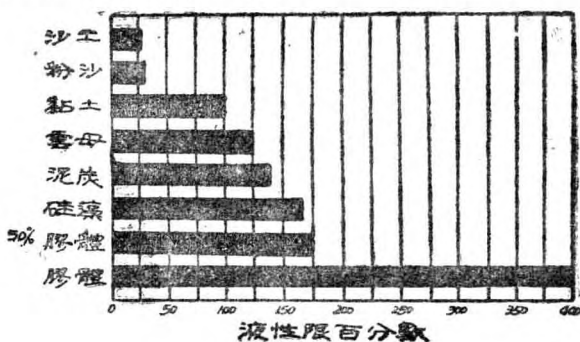


圖 25. 各種土壤之液性限度

(1)液性限度之手測法 取通過#40 篩之土壤約 30 公分，置於蒸發皿中，加水用軟刀藥刀(spatula)拌和之，使樣品與水混合成糊狀，然後將皿內土壤攤平，使皿中部之土壤厚度為 $3/8$ 吋，用梯形畫

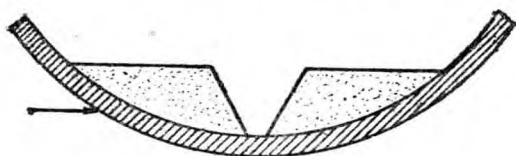


圖 26. 畫溝器劃開後皿中土壤形狀

溝器(grooving tool)將土壤之中部畫開，如圖 26 所示。用一手緊握蒸發皿，使梯形溝與視線平行，輕輕將皿向其他一手心拍擊 10 次，拍擊之速度與用力之大小係由經驗而來。含水量相等之土壤樣品，用手擊法拍擊 10 次，應與機械測法中銅杯敲擊 25 次之結果相同。若拍擊 10 次後皿中土壤梯形溝底仍未連接，則該土壤之含水量尚未達到液性限度。應再加水拌和之，再重覆以上手續。反之，若拍擊次數未滿 10 次而皿中土壤梯形溝底已連接，則該土壤之含水量已超過液性限度。應加乾土壤拌和之，重覆上述之手續。若拍擊 10 次後



圖 27. 達到液性限度時皿中土壤形狀

皿中土壤梯形溝底適已接連，則此時土壤之含水量適達液性限度。如圖 27 所示，圖中箭頭表示旁面流動之方向。用藥刀取出皿中溝底附近土壤少許，置於鍍面玻璃或白鐵盒中，稱其重量後移入溫度 110°C

之電爐中，烘乾至重量不變時為止，移入氯化鈣乾燥器中，俟其冷後再稱其重量，液性限度之值可由下式計算之：

$$\text{液性限度(L.L.)} = \frac{\text{土壤含水重量}}{\text{烘乾土之重量}} \times 100.$$

(2)液性限度之機械測定法 機械測法與手測法試驗步驟大致相同，惟需樣品約 100 公分，於樣品拌和成漿狀後，由皿中取出一部分土壤置於客斯格蘭地液性限度試驗儀(Casagrande's liquid limit device)之銅杯中(圖 28)。用藥刀攤平，使其中心厚度為 1 公分，用梯形畫溝器畫成整潔之溝，以每秒鐘 2 次之速度旋轉儀器之柄，柄軸轉時則銅杯隨之上下，同時碰擊器底引起震動，使溝之兩旁土壤漸

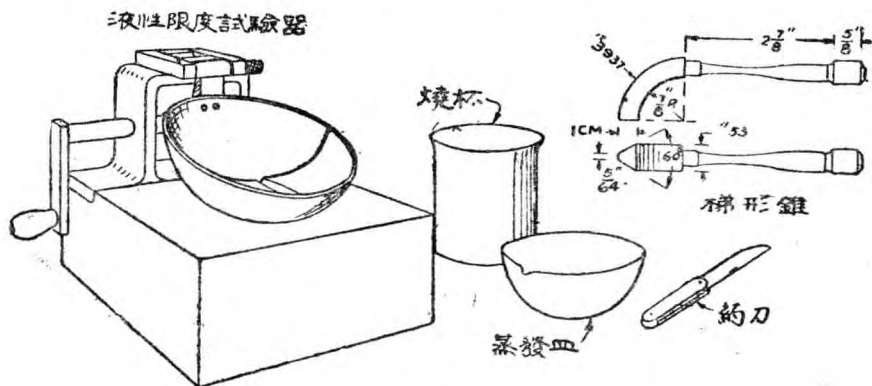


圖 28. 液性限度機械測定法所用之儀器

漸下滑而相接連，俟溝底適在密合時，停止搖轉，紀錄旋轉次數，用藥刀取出一小部土壤，測其含水百分數如上述。

由上所得之結果，可繪成流動曲線(flow-curve)。曲線表示土壤

含水百分率與敲擊次數之關係。用半對數圖解紙(semi-log paper),

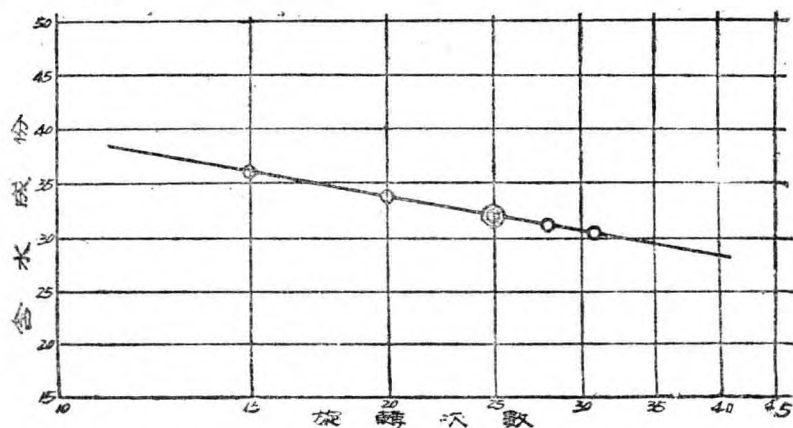


圖 29. 流動曲線

以縱座標等距離格子表示含水百分率，以橫座標對數格子表示旋轉次數，以直線連接各點。在敲擊 25 次時與此直線相交之點，所表示之含水百分率即為該土壤之液性限度，如圖 29。手測法之液性限度亦可依此法決定。

塑性指數之迅速測定法 用上所述之塑性限度與液性限度之測定法，需時較長，蓋需經過稱重、烘乾等手續，至少需 24 小時。設若急欲得實驗結果，或欲在工地上求土壤之塑性指數，則可用下法求之：

稱出土壤樣品 33.3 公分，用滴定管 (burette) 滴水入土中，拌和之。用手測法求液性限度，若所加之水未達到液性限度，則更由滴定管中加水拌和之，至土壤含水適達液性限度時為止，記錄所加水

之分量，則：

$$\text{液性限度} = \text{所加立方公分水} \times 3.$$

用同法可求得土壤之塑性限度。用此種實驗法為防止水分蒸發起見，全部手續應在四分鐘內完畢，同時應在避風處舉行，其結果始能準確。

第三節 野外含水當量之測定

一滴水滴於光滑之土壤表面，而不立即吸收，呈光潤狀態，此時土壤之含水，以其烘乾土壤百分率表之，即為該土壤之野外含水當量。當土壤含水達到野外含水當量時水點之所以不能透入土壤者，不外下列三種原因：

(1) 當不具膨脹性，無黏性土壤如沙土之空隙完全被水充滿時。

(2) 當具膨脹性，無黏性土壤如硅藻、雲母 (mica) 等之毛細管完全充滿水分時。

(3) 當黏性土壤所含之水分足使土壤表面呈光潤狀態，此層表面可防水透入，雖然此時土壤之含水遠在其毛細張力需水之下。

將通過 #40 篩之晾乾土壤樣品，取出 50 公分，置於蒸發皿中，加少許清水拌和之，使成球狀，然後用藥刀輕輕壓平之，如圖 30 (a)，用移滴管 (pipette) 滴水一滴於其表面，如水點在 30 秒內被土壤吸收，應再加水拌和之；重覆以前手續，直至水點適在 30 秒鐘內仍不被吸收，而留於土壤表面呈光潤狀，如圖 30 (b)，此時土壤之含水量即為野外含水當量。壓平土壤時應注意所施壓力之大小，壓力過小則水點甚易透入，壓力過大則水點不易透入，因之實驗結果每次不

同。初學者可用藥刀將混合均勻之土壤切開，然後滴水於切面上，此

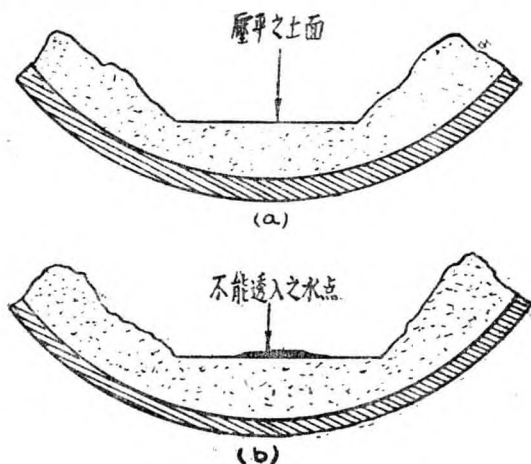


圖 30. 野外含水當量之測定法

法較易學習。用藥刀取出水點下之土壤少許，置於鍍面玻璃中，稱其重量，移入爐中烘乾，俟其冷後再稱之，記錄其重量。野外含水當量可以下式計算之：

$$\text{野外含水當量(F.M.E.)} = \frac{\text{土壤含水重量}}{\text{烘乾土重量}} \times 100.$$

第四節 離心含水當量之測定

將已飽和之土壤樣品，置於離心力大於地心引力 1,000 倍之離心器中，1 小時後土壤之含水量，以其烘乾土壤百分率表之，即為該土壤之離心含水當量。

離心作用對土壤有兩種影響：(a) 凝實土壤，驅出土壤中含水，

使向樣品之上下排出，(b)將水分由坩堝之孔眼排去。此兩種力量使

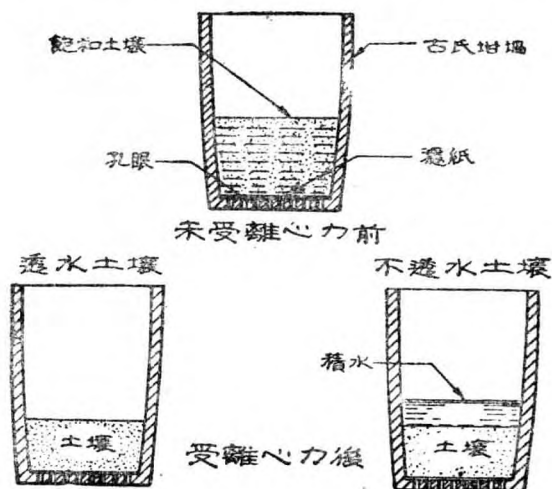


圖 31. 古氏坩堝

樣品受有每平方公分 2 公斤之壓力。在透水樣品中，所有水分均可驅出；在不透水樣品中，則僅有一部向下之水分被驅出，其向上者則積留於樣品之上，稱為積水 (water-logging)，如圖 31。

離心含水當量可表示下列各種現象：

- (1) 可鑑別土壤是否具滲透性。
- (2) 可斷定滲透性土壤所具毛細張力之大小。
- (3) 可鑑別具膨脹性之滲透質土壤與不具膨脹性之滲透質土壤。

將通過 # 40 篩之晾乾土壤樣品，取出 5 公分置於古氏坩堝 (Cooch crucible) 中，坩堝之底面先鋪以濾紙，然後將坩堝置於蒸餾水

中，使土壤吸收水分，至完全飽和時為止。土壤吸收水分是否已達飽和，可視土壤表面是否有游離水(free water)而定。然後將坩堝移入潮溼器中(humidifier)約12小時，使土壤中之含水量分配均勻。最後傾去表面上多餘水分，將坩堝裝入砲耳杯(trunnion cup)中如圖32。再將砲耳杯裝於離心旋轉器(centrifuge)中，使之旋轉一小時。旋轉

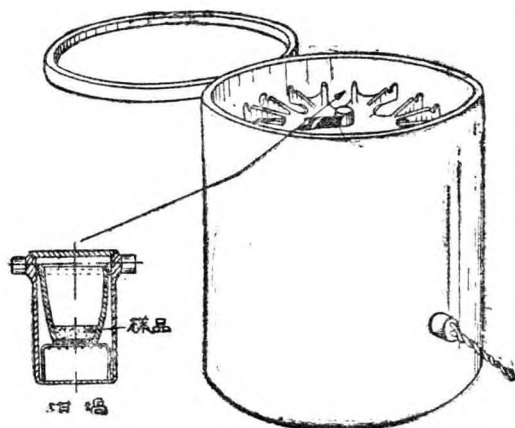


圖32. 離心旋轉器

之速度，應使離心力為地心對土壤樣品所發生之引力一千倍，其速度因離心器冠(centrifuge head)之直徑而定。

- 設 W = 土壤之重量，
 n = 每分鐘旋轉次數，
 R = 離心器冠之半徑，

則

$$n = \sqrt{\frac{30,000 g^2}{WR \pi^2}}$$

離心器旋轉停止後，即將坩堝取出，稱其重量。將坩堝置於溫度 110°

C 之電爐中烘乾之，紀錄其重量。若離心器停止旋轉後，土壤之表面留有積水，應稱積水與土壤之合重，離心含水當量可用下式求之：

$$\text{離心含水當量(C.M.E.)} = \frac{(A-b)(A_1-t_1)}{A_1-(C+b_1)} \times 100,$$

式中 A = 離心試驗後坩堝與樣品之合重，

A_1 = 爐內烘乾後坩堝與樣品之合重，

C = 坩堝之重量，

b = 溼濾紙之重量，

b_1 = 乾濾紙之重量。

每種樣品最少應作兩次試驗，其結果之差誤，如離心含水當量在 15 以下者應小於 1%，在 15 以上者應小於 2%。

離心含水當量之值大之土壤，其毛細張力亦大。毛細作用為公路路基建築所應避免者，故適宜於路基建築之土壤，其離心含水當量應在 12 以下，普通以不過 6 與 8 為宜。

第五節 收縮因數之測定

土壤之收縮因數 (shrinkage factors) 包括有收縮限度 (shrinkage limit)、收縮比率 (shrinkage ratio)、比重、體積變化 (volumetric change) 及線狀收縮 (linear shrinkage) 等五種。茲分述如下：

收縮限度 土壤之收縮原因全在其毛細壓力作用。設某種土壤之空隙完全充滿水分，即在液狀時，在此種情形下，水分之表面張力所生之收縮力為零。水分漸漸蒸發，毛細張力開始活動，在每粒土壤顆粒之外面以垂直於表面之方向向內曳引，使土壤體積漸漸縮小，

同時土壤本身抵抗收縮之力亦漸漸增加，終至土壤之抵抗收縮力與蒸發含水之毛細壓力達於平衡。此後土壤雖更行蒸發，其體積亦不更有顯著之變化。在此平衡狀況時，土壤之含水謂之收縮限度。

凡具有膨脹性之土壤，乾燥時體積縮小，謂之具有有效收縮限度 (effective shrinkage limit)。凡不具膨脹性之土壤，乾燥時體積並不縮小，謂之具有理論收縮限度 (theoretical shrinkage limit)。理論收縮限度之值不能以試驗得之，但可由土壤之比重計算得之。

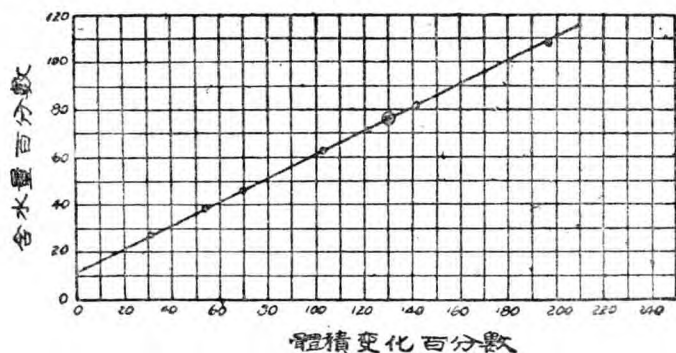


圖 33. 體積變化與含水之關係

收縮比率 圖 33 表示收縮限度與收縮比率之測定法。圖中所用之土壤為黏土，橫座標表示乾土丕 (dried soil pat) 之體積變化成分，縱座標表示含水量 (以乾土丕重量成分表之)。由圖可知含水量之增加與體積變化成正比例。直線與縱座標相交之點為 11.1%，即在 11.1% 含水時土壤不發生體積變化；換言之，11.1% 即該土壤之收縮限度。

圖中含水成分由 107.8% 減至 11.1%，其時土壤之體積變為

乾時 200%，收縮比率應為：

$$\frac{200}{107.8 - 11.1} = \frac{200}{96.7} = 2.07,$$

此即直線之斜度。

- 設 S = 收縮限度，
 V = 溼土丕之體積，
 V_0 = 乾土丕之體積，
 w = 含水量，
 W = 溼土丕之重量，
 W_0 = 乾土丕之重量，
 R = 收縮比率，
 G = 土壤之顆粒比重。

由原始含水量 w 至收縮限度 S 間，土丕之體積變化為 $V - V_0$ ，其所失之含水量為：

$$\frac{w \times W_0}{100} - \frac{S W_0}{100} = \frac{W_0(w - S)}{100}.$$

如用 C.G.S. 單位計算，則 $\frac{W_0(w - S)}{100}$ 亦即係其所失之含水體積：

$$\frac{W_0(w - S)}{100} = V - V_0.$$

$$S = w - \frac{V - V_0}{W_0} \times 100. \quad (1)$$

收縮比率之定義，為以乾土體積成分代表之體積變化除以乾土重量

成分代表之收縮限度所失之含水，以公式表之，則為：

$$R = \frac{\frac{V - V_o}{V_o} \times 100}{w - S}$$

由公式(1)， $w - S = \frac{V - V_o}{W_o} \times 100$,

故

$$R = \frac{\frac{V - V_o}{V_o} \times 100}{\frac{V - V_o}{W_o} \times 100} = \frac{W_o}{V_o} \quad (2)$$

比重 土壤顆粒比重為乾土之重量公分數，除其真實體積 (true volume) 立方公分數，而乾土之真實體積為其外表體積 (apparent volume) 減去在收縮限度時之含水量，以公式表之，為：

$$G = \frac{W_o}{V_o - \frac{SW_o}{100}} = \frac{1}{\frac{V_o}{W_o} - \frac{S}{100}} = \frac{1}{\frac{1}{R} - \frac{S}{100}} \quad (3)$$

由體積變化所算出比重之值不能十分準確，蓋以上之公式均假設含水成分與體積變化成直線關係，而事實上並非所有土壤皆如是。有彈性之土壤當水分減少時，恆有膨脹現象，尤以含有雲母之土壤為甚。

體積變化 土壤在一定含水量時之體積變化，為土壤含水由野外含水當量減至收縮限度時之體積變化，用乾時體積成分表之。

設 $F.M.E$ = 野外含水當量，

G = 土壤顆粒比重，

S = 收縮限度,

R = 收縮比率,

C_f = 體積變化.

則

$$C_f = (F.M.E - S)R.$$

由

$$G = \frac{1}{\frac{1}{R} - \frac{S}{100}}, \quad R = \frac{1}{\frac{1}{G} + \frac{S}{100}},$$

代入, 得

$$C_f = \frac{F.M.E - S}{\frac{1}{G} + \frac{S}{100}}.$$

線狀收縮 土壤在一定含水量時之線狀收縮, 爲土壤含水由野外含水當量減至收縮限度時, 所減少之一方向大小, 用其原來之大小表示之:

$$\text{線狀收縮} = 100 \left(1 - \sqrt[3]{\frac{100}{C_f - 100}} \right).$$

圖 34 表示由上列公式所計算得之體積變化與線狀收縮之關

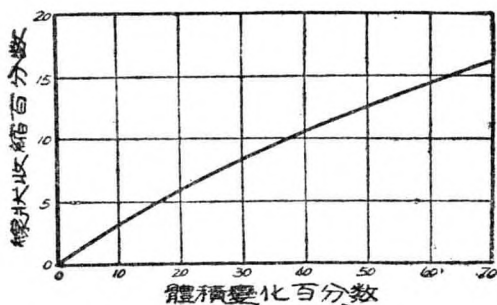


圖 34. 體積變化與線狀收縮之關係

係。

收縮因數之測定法 取通過 #40 篩之土壤樣品 30 公分，置於蒸發皿中，徐徐加水，務使土壤之空隙完全充滿水分，並使其成爲漿狀，以便移入圓形平底牛乳皿(milk dish)內。脆性土壤所需水分大約等於或略大於其液性限度；塑性土壤所需水分約較其液性限度大百分之十。

牛乳皿內須先塗以薄層凡士林(vaseline)，以防土壤乾後附着於皿邊。而後將三分之一土壤放於皿之中心，以皿底在厚書上敲擊，使土壤向皿四周流動，再加等量之土壤，如法敲擊，最後再加一部分，並使多餘土壤由皿之四周溢出。用鐵界尺(steel straight edge)沿皿邊將餘土括去，留下光滑之表面。拭去皿外附着之土壤，立即稱其重量。在空氣中晾乾約 24 小時，再烘於 110°C 之電爐中，至其重量不變時爲止，稱其重量。空皿之重量應預先稱出，皿之體積即溼樣品之體積，可用水銀量之；將皿中充滿水銀，用玻璃片緊壓，使多餘水銀由皿周圍溢出，然後用量筒(graded cylinder)量皿內水銀之體積。此體積即爲溼樣品之體積(V)。由爐中取出乾樣品，其體積可用下法求得之。

先將水銀充滿於玻璃杯中，用三腳玻璃片(glass plate with 3 metal prongs)緊壓於皿口，除去溢出之水銀，並拭淨附於皿邊之水銀珠。然後將乾樣品之體積浸入皿內水銀中，再用三腳玻璃片將樣品壓下，使杯中水銀漸溢出如圖 35。壓時應注意皿中勿使有隱藏之空氣泡，則所排出之水銀，即爲乾樣品之體積(V_0)，可量其體積於量杯中。

收縮因數

比重

皿號目		土壤號目		
皿與溼土重		皿與空氣晾乾土重		
皿與乾土重		皿與爐內烘乾土重		
皿重		皿重		
水分重量		空氣晾乾土重		
乾土重量		爐內烘乾土重		
皿體積		水分重量		
排出水銀體積		收溼含水重		
體積變化		收溼含水改正係數		
水分百分率		比重瓶與水之合重		
體積變化百分率		比重瓶與爐內烘乾土重		
收縮限度		爐內烘乾土重		
收縮比率		爐內烘乾土重減收溼含水重		
比重約數		比重瓶及水與土壤合重		
平均體積變化		比重		
平均收縮限度		機械分析總結果		
平均收縮比率			礫石	
平均比重約數			沙土	
			粉沙	
			黏土	
		膠體		

第六章 土壤之機械分析

土壤之機械分析 (mechanical analysis) 為測量土壤顆粒尺寸之實驗。土壤顆粒之分布，對於土壤之物理性並無重大關係，兩種顆粒分布完全相同之土壤，其物理性可以完全不同，故不可用土壤之機械分析結果判斷土壤之物理性。

土壤之種類可按土壤顆粒大小分為若干類，分類之方法各國採用不同，茲舉其重要者列如表 9。

顆粒徑在 0.074 公厘 (即在 # 200 篩) 以上之土壤可用篩分析法 (sieve analysis) 求其大小，在 0.074 公厘以下者則須藉沉澱法 (sedimentation) 求之。沉澱法係根據斯圖克定律 (Stoker's law) 而來。斯圖克定律稱：“小圓球體在液體中之沉澱速度與圓球直徑之平方成正比例”。普通所用沉澱法有二種，即連續沉澱法 (successive sedimentation) 與波爾克比重計 (Bouyoucous hydrometer) 法二種。前者儀器設備最為簡單，但計算法則甚煩重，後者較為準確，為土壤實驗室標準機械分析測定法。

第一節 連續沉澱法

連續沉澱法為奧特伯氏所創，用此法分析小顆粒土壤，手續及計算雖煩重，然在實驗設備不全之實驗室中，用此法可代替比重計法，在工地做臨時實驗時尤為便利。設顆粒比重 G 之土壤沉澱於比重 G_1 之液體中，則按斯圖克定律：

表 9.

Bureau of Soil U S. Dept. of Ag.	International	Size (mm.)	Berlin Tech- nische Hoch- schule.	Bureau of Public Roads U.S.A.
		10.0		
		5.0	Grob Kies	
		3.0		
		2.0	Fein Kies	Gravel
Fine Gravel	Very Coarse Sand	1.0		
Coarse Sand	Coarse Sand	0.5	Grob Sand	
Medium Sand		0.25		Coarse Sand
	Medium Sand	0.20	Mittle Sand	
Fine Sand	Fine Sand	0.10	Fein Sand	
Very Fine Sand	Coarse Mo	0.05	Grob Mo	Fine Sand
	Fine Mo	0.02	Fein Mo	
	Coarse Silt	0.006	Grob Schluff	
Silt		0.005		Silt
	Fine Silt	0.002	Fein Schluff	
	Coarse Clay	0.0006		
	Fine Clay	0.0002		
Clay			Ton	Clay
	Ultra Clay			

$$d = \sqrt{\frac{3 \cdot n \cdot L}{980 (G - G_1) T}}$$

式中 L = 在一定時間內土壤顆粒沉澱距離(公分),

n = 液體之黏度係數,

d = 土壤顆粒之直徑(公厘),

T = 沉澱時間(分)。

水在 67°F 時 $n = 0.0102$, n 之值隨溫度而變。上列公式只能應用於土壤顆粒直徑在 0.2 公厘至 0.0002 公厘者, 在 0.0002 公厘以下土壤顆粒, 係在懸置膠體(suspended colloid)狀況下, 其行為完全不同。顆粒在 0.2 以上者, 其沉澱速度不一律, 亦不能應用斯圖克定律。

試驗時稱出 50 公分土壤樣品, 置於臼中, 加蒸餾水用包有橡皮之杵磨之, 使其顆粒分散, 然後加滿蒸餾水於臼中, 攪動之再使沉澱約 5 分鐘。將上面一部有懸置之溶液傾入量筒中, 更以杵磨研所餘土壤沉澱, 再加水, 攪之, 停置少頃, 傾去表面上一部懸置溶液於量筒中, 如是重覆以上手續若干次, 直至全部土壤完全分散完畢為止。

用此法每 35 公分土壤約須加水一公升, 以免溶液過濃, 土壤沉澱時聚成一團。量筒之高度至少須在 10 公分以上, 蓋若沉澱距離 (L) 過短, 則沉澱需時過短, 結果不易準確。記載溶液開始沉澱時間, 至一定時間 (T) 後, 用虹吸管吸出未沉澱之溶液, 同時量沉澱之距離 (L), 則顆粒之大小可由斯圖克定律求得。

例如欲測定土壤中黏土成分, 即 0.005 公厘以下土壤之成分。假定 $G = 2.67$, $G_1 = 1.00$, $n = 0.0102$, $L = 10$ 公分, 則由公式

$$0.005 = \sqrt{\frac{30 \times 0.0102 \times 10}{980(2.67 - 1.00)T}}$$

$$T = 75.$$

即在 75 分鐘後所有大於 0.005 公厘之土壤顆粒均已沉澱，可用虹吸管吸出未沉澱之溶液，將沉澱物烘乾稱之，即得黏土之成分。有時有一小部小於 0.005 公厘之顆粒亦沉澱於內，故用此法應重覆數次以求其平均數。

第二節 比重計法

用比重計測土壤之顆粒大小，係密西根 (Michigan) 大學波爾克 (Bouyoucos) 教授所首創，法係根據土壤溶液密度隨沉澱時間而變之原理。土壤溶液之密度變化可用比重計 (hydrometer) 求得之。此法經美國公路局 (Bureau of Public Roads) 所採用，復經客斯格蘭地氏 設計特製比重計以讀細微之比重變化，並製圖解改正比重計測定時之各種誤差。此法現已漸趨標準矣。

由第五章第一節所準備之通過 #10 篩，取出樣品，如所試之土壤係沙土質應取 115 公分，如係粉沙或黏土則需 65 公分，其中 15 公分係準備作收溼含水 (hygroscopic moisture) 試驗之用。應先稱得此部樣品之重量，置於 110°C 電爐中，烘乾至其重量不變時為止，記錄其乾重。

比重計測定法 由物理性試驗結果，視土壤之塑性指數之值，依下列二法作該土壤之機械分析。

(一) 塑性指數小於 20 者：將晾乾土壤置於一高燒杯 (beaker)

中徐徐加入 200 c.c. 蒸餾水，並用玻璃桿攪動之，使土壤各部完全潤溼。然後使杯中溶液靜停約十八小時，而後再用蒸餾水，將杯中土壤沖洗入分散杯 (dispersion cup) 中，至充滿杯邊 2 吋為止。再加 20 c.c. 解化劑 (deflocculating agent) 之矽化鈉結晶體 ($\text{Na}_2\text{SiO}_5 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) 溶液，矽化鈉溶液之密度應合於下列任一種條件：

- (1) A 種比重計讀數在 67°F (19.4°C) 為 36.5 者。
- (2) B 種比重計讀數在 67°F (19.4°C) 為 1.023 者。
- (3) Beaume 比重計讀數在 76°F (24.4°C) 為 3° 者。

然後用攪動器 (stirring apparatus) 將杯中溶液攪動一分鐘。

(二) 塑性指數高於 20 者：將晾乾土壤置於高燒杯中，徐徐加入 100 c.c. 之 6% 二氧化氫溶液，不斷用玻璃桿攪動之，使土壤各部完全潤溼，然後用玻璃片蓋燒杯口，置燒杯於 110°C 之電爐中一小時。二氧化氫之作用在協助土壤之分散。由爐中取出燒杯後再加以 100 c.c. 之蒸餾水，然後使杯中溶液靜停約十八小時，再洗入分散杯中，攪動一分鐘如前。

土壤在攪動器分散後即傾入高量筒中，加以蒸餾水至 1,000 c.c. 將量杯置於水池 (water bath) 中，徐徐攪動杯中之懸置物。至量杯中溶液溫度與水池中水之溫度相同時，可將量筒取出，以橡皮塞或手掌緊封筒口，上下倒置搖動凡一分鐘。立時記錄搖動停止後之時間，仍將量筒置於水池中，並將比重計及溫度計插於懸置液中。在第一分鐘及第二分鐘後，各記比重計之讀數。讀比重計時應讀懸置與比重計管所成之彎月面 (meniscus) 頂上之讀數。如用比重計 A，應讀至最近之 0.5 公分/公升。如用比重計 B，應讀至最近之 0.0005 比

重。隨後應於懸置開始沉澱後之第 5, 15, 30, 60, 250, 1440 分鐘

各記比重計及溫度計之讀數。在每次讀過比重計後，應將比重計由懸置中輕輕取出，用布拭淨，然後於第二次讀數開始前 20 秒鐘，再將比重計輕輕插入懸置中。讀時應在比重計完全靜止而不上下浮沉之時。

比重計試驗結束後，將量筒中之溶液傾於 #200 篩上，並用水沖洗，務使小於 #200 篩孔之顆粒完全通過。然後將留於篩上之土壤取下，烘乾於爐中，再使之濾過 #20, #40, #60, #140 及 #200 全套篩，並用機械搖動器 (mechanical shaker) 搖動約十五分鐘。稱停留於每號篩上土壤之重量。

比重計測定法之計算 比重計測定法之計算，分收溼含水，粗料及懸置土壤成分之計算三部。茲分述如下：

(1) 收溼含水之計算：土壤經空氣晾乾後，其中仍有少量之水分，此部含水稱為收溼含水。其測法可將晾乾之土壤約 15 公分，置於電爐中烘乾至其

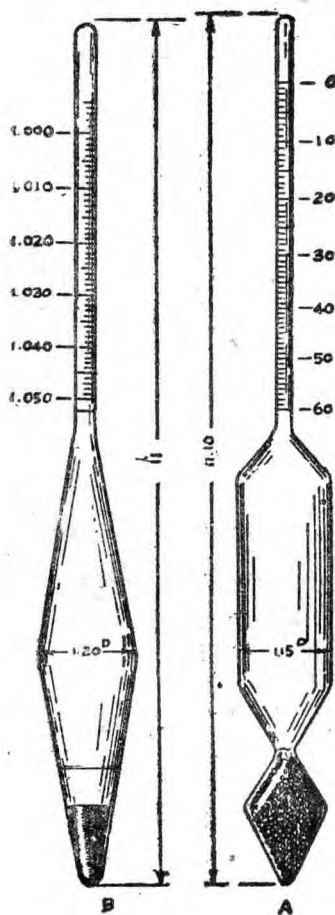


圖 57. 比重計

重量不變時為止。計算法可由下式表之：

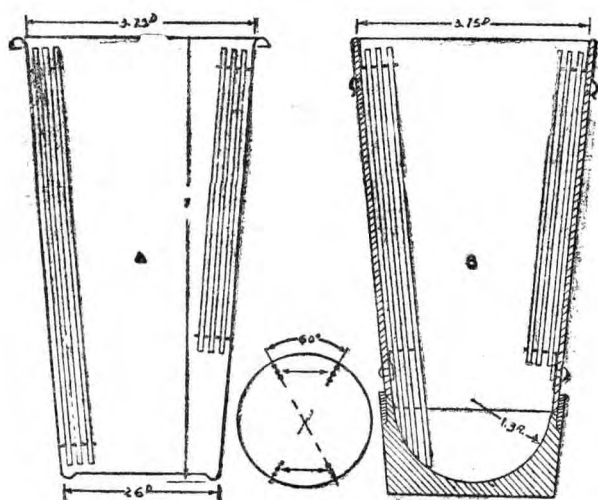


圖-8. 分設杯

$$\text{收溼含水} = \frac{(\text{晾乾土壤樣品重}) - (\text{烘乾土壤樣品重})}{(\text{烘乾土壤樣品重})} \times 100.$$

由晾乾土壤樣品之重變為爐內烘乾土壤之重量，應乘以下列係數：

$$\text{改正係數} = \frac{100}{100 + \text{收溼含水百分數}}.$$

(2) 粗料之計算：土壤中粗料成分之計算，已見第五章第一節實驗中。將晾乾土壤樣品之總重減去留於 #10 篩之樣品重，即為通過 #10 篩晾乾樣品之重。留於 #10 篩以上之土壤雖亦有收溼含水，但與通過 #10 篩之土壤所有之收溼含水量相較，其量甚微，可忽略之。將通過 #10 篩之晾乾土壤之重乘以收溼含水改正係數，可得爐內烘乾土壤之重。再將此重加上停留於 #10 篩以上之土壤樣品之

重，即為全部烘乾樣品之總重；以此重為準，即可求得留於 #10 篩以上各粗料之成分。

(3) 懸置土壤之成分： 在水溫度不定時，影響於比重計之讀數，須將其所得讀數加以改正，如圖 39， ΔR 之增減可由圖中直接讀得。

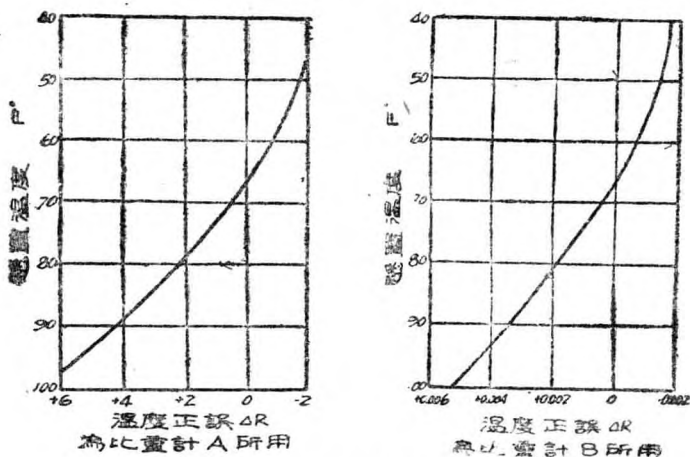


圖 39. 溫度正誤圖解

此圖應於每個新比重計開始使用時測得一新曲線。懸置中土壤成分不但因比重計之讀數而變，更與分散土壤之數量及其比重有關。

$$\text{比重計 A} \quad P = \frac{Ra}{W} \times 100;$$

$$\text{比重計 B} \quad P = \frac{1606(R-1)\alpha}{W} \times 100.$$

式中 P = 最初分散之土壤留於懸置中之百分數，

R = 改正後比重計之讀數，

W = 最初分散之土壤重量,

a = 懸置密度常數.

用比重計 A, 若水之密度在 67°F 為 0.9984, 土壤之比重為 G 時, 則

$$a = \frac{2.6500 - 0.9984}{2.6500} \times \frac{G}{G - 0.9984};$$

用比重計 B, 若水之密度在 67°F 為 1.0000, 土壤之比重為 G 時, 則

$$a = \frac{2.6500 - 1.0000}{2.6500} \times \frac{G}{G - 1.0000}.$$

以上二式所求得 a 之值, 除因比重 G 不同, 結果相差較大外, 水之密度影響極微, 在小數兩位之內毫無差別. a 之值如表 10 所列. 若遇土壤比重未列入在表中時, 可選擇其較接近者檢出 a 之值, 已足應用.

表 10.

比 重	常 數
2.95	0.94
2.85	0.96
2.75	0.98
2.65	1.00
2.55	1.02
2.45	1.05
2.35	1.08

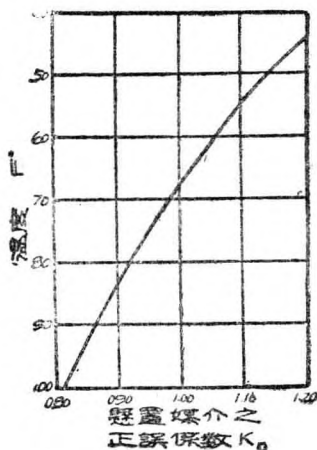
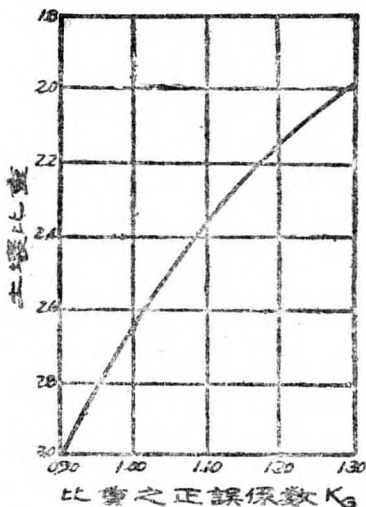
(4) 懸置土壤之顆粒直徑: 第一節所述之斯圖克定律:

$$d = \sqrt{\frac{30nL}{980(G-G_1)T}}$$

假定 $L=32.5$ 公分, $n=0.0102$, $G=2.65$, 則可求得懸置於水中最大顆粒直徑如表 11。

表 11。

時 間 (分)	懸置中最大顆粒徑 D_a (公厘)
1	0.078
2	0.055
5	0.035
15	0.020
30	0.014
60	0.010
250	0.005
1440	0.002

圖 40. 黏滯正誤係數 K_n 圖 41. 比重正誤係數 K_g

但實際上此種假定不能成立，比重計之讀數，不過指比重計附

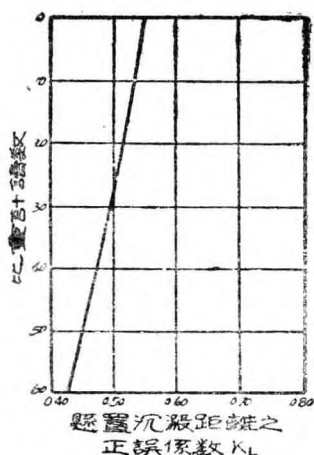


圖 40. 懸置沉澱距離之正誤係數 K_L (比重計 A 用)

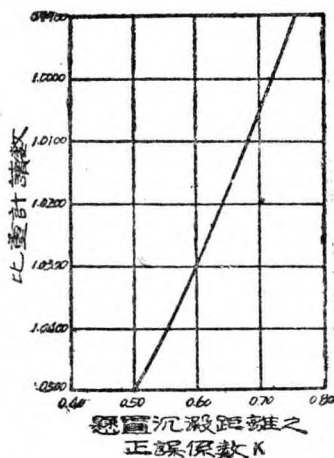


圖 41. 懸置沉澱距離之正誤係數 K_L (比重計 B 用)

近土壤溶液之比重，且土壤之顆粒在一定時間內沉澱距離 L 並非常數，因溶液之密度並不均勻，同時土壤比重 G 及水之黏滯係數亦均非常數，故對表 11 所列之值應照以上三項變化加以改正。

$$K_n = \sqrt{\frac{\text{一定溫度時之黏滯係數 (圖 40)}}{0.0102}} \quad (\text{圖 40}).$$

$$K_G = \sqrt{\frac{16.5}{\text{土壤顆粒比重} - 1}} \quad (\text{圖 41}).$$

$$K_L = \sqrt{\frac{\text{假定沉澱之距離 (公分) (圖 12, 43)}{32.5}} \quad (\text{圖 12, 43}).$$

實際上顆粒之直徑為 $D = D_a \times K_n \times F_G \times K_L$ 。

計算舉例

(A) 收溼含水:

(1) 空氣晾乾土壤重	15.00
(2) 爐內烘乾土壤重	14.63
(3) 收溼含水重	2.53
(4) 收溼含水改正係數	0.975

(B) 粗料:

(1) 空氣晾乾樣品之總重	318.3
(2) 留於 #10 篩之洗過烘乾樣品重量	56.2
(3) 濾過 #10 篩之空氣晾乾樣品重量	262.1
(4) 濾過 #10 篩乘收溼含水改正係數重量	255.5
(5) 改正後樣品總重量	311.7
(6) 留於 #4 篩之烘乾樣品重量	40.6
(7) 留於 #4 篩土壤重量對於全部改正後樣品 重量之百分數 $\frac{(6)}{(5)}$	13.0%
(8) 留於 #10 篩土壤重量對於全部改正後樣品 重量之百分數 $\frac{(2)}{(5)}$	18.0%

(C) 懸置土壤成分及其顆粒徑:

(1) 留於 #10 篩土壤重量之百分數 (B, 8)	18.0%
(2) 所分散空氣晾乾土重量	100.0
(3) 所分散爐內烘乾土重量 (100×0.975)	97.50

- (4)全部樣品重量,以乾土重表之 $\frac{97.50}{1-0.18}$... 118.0
- (5)土壤之比重 2.41
- (6)土壤之比重正誤常數 α 1.05
- (7)塑性指數 12.0
- (8)開始沉澱時間 8:41A.M.
- (9)土壤比重正誤係數(K_G) 1.07

表 12.

間隔時間 (I)	時 間 (II)	華氏溫度 (III)	比重計讀數			$P = \frac{100Ra}{W}$ (VII)	全之百分樣品數 P_1 (VIII)	顆粒直徑 D (IX)	正誤係數		改直 正徑 後 D_c (XII)
			原讀數 (IV)	溫度改正					K_L (X)	K_n (XI)	
				ΔR (V)	R_C (VI)						
1	8:42	70	34.0	+0.4	34.4	37.4	30.7	0.078	0.48	0.98	0.0306
2	8:43	70	25.5	+0.4	25.9	28.0	23.1	0.055	0.50	0.98	0.0291
5	8:47	70	19.0	+0.4	19.4	21.1	17.3	0.035	0.51	0.98	0.0189
15	8:57	70	15.0	+0.4	15.4	16.8	13.7	0.020	0.52	0.98	0.0110
30	9:12	70	12.0	+0.4	12.4	13.5	11.9	0.014	0.53	0.98	0.0079
60	9:42	70	10.5	+0.4	10.9	11.9	9.7	0.010	0.53	0.98	0.0056
250	12:32	70	7.0	+0.4	7.4	8.1	6.6	0.005	0.54	0.98	0.0029
1440	8:42	68	3.0	+0.1	3.1	3.4	2.8	0.002	0.55	0.99	0.0012

表中 $R_C = H + \Delta R$;

$$P = \frac{Ra}{W} \times 100 = \frac{R \times 1.05}{97.5} \times 100 = 1.08R;$$

$$P_1 = P \times \frac{100 - \% \text{ 留於 } \#10 \text{ 篩}}{100} = \frac{P(100 - 18.0)}{100} = 0.82P;$$

K_n , K_G , 及 K_L 之值係各讀自圖 40, 41 及 42 或 43;

$$D_C = D \times K_G \times K_L \times K_n.$$

(D) 篩分析:

(1) 全部樣品重量, 以乾土重表之(見 79 頁, 第 4 項),

(2) 濾過 #10 篩之土壤重量(見 78 頁, 第 3 項),

(3) 留於 #10 篩之土壤重量(1) - (2)

表 13.

篩 之 號 目	篩 之 孔 徑	留 於 篩 上 土 壤 總 重	改 正 後 留 於 篩 上 土 壤 重	改 正 後 留 於 篩 上 之 總 百 分 數	濾 過 篩 之 全 部 百 分 數
(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)
10	1.651	0	20.50	17.2	82.8
20	0.833	2.35	22.35	18.8	81.2
40	0.417	2.59	25.44	21.3	78.7
60	0.246	4.12	29.53	24.8	75.2
100	0.104	9.41	38.97	32.7	67.3
200	0.074	12.11	51.03	43.0	57.0

(E) 繪圖及報告: 將以上試驗結果, 用半對數圖解紙, 繪製土壤顆粒直徑累積曲線(soil grain diameter accumulation curve)如圖 44.

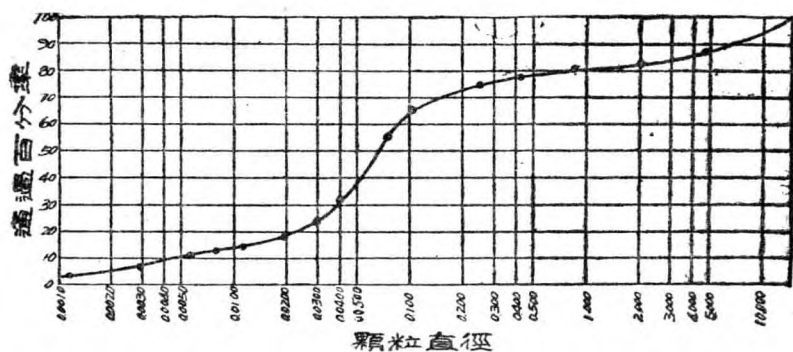


圖 44. 土壤顆粒直徑累積曲線

圖係用表 12 中 D_0 及 P_1 兩行及表 13 中 (B), (F) 二行之紀錄繪成。由圖可得下列之總結果：

礫石 (2.0 公厘以上)	17.0%
粗沙 (2.0 - 0.25 公厘)	7.0%
細沙 (0.25 - 0.05 公厘)	37.0%
粉沙 (0.05 - 0.005 公厘)	31.0%
黏土 (0.005 公厘以下)	8.0%
膠體 (0.001 公厘以下)	2.0%

第七章 土壤分組及鑑別

土壤之種類至多，其性質又各不相同；為便於研究起見，應將土壤分為有系統之組別。以前土木工程司對於土壤之描寫往往極為空洞，例如工程手冊中，在建築規範內，規定軟黏土質土壤之承载力 (bearing capacity) 為每平方呎一噸，事實上軟黏土所包括之範圍極

廣，若加以嚴格試驗，則其承载力可高至數噸，可低至近於零。又如一般描寫土壤時多僅用最簡單之名詞，如稱某處土壤為黏土，而事實上係粉沙土；稱某處土壤為沙土，則不問其為流沙或沖積沙，因此往往引起誤會。故研究土壤者應將土壤加以科學化之組別。土壤分組法研究者之出發點各有不同，其所用之方法不外下列數種：

- (1) 土壤之礦物成分。
- (2) 土壤之空隙體積。
- (3) 土壤之顆粒直徑(機械分析)。
- (4) 土壤之含水量。
- (5) 土壤之膠體成分。

以上各種分組方法均未能適合工程上土壤分組之需要，且其中困難重重，不易實行。例如土壤礦物成分之分析需要貴重之化學及分光儀器；土壤之空隙體積雖易測定，但吾人至今尚未能明瞭空隙體積與土壤各種物理性之關係；機械分析之測定，若欲求 0.074 公厘以下之顆粒半徑極為困難，需時至少二星期，始能完成實驗手續，且顆粒分布完全相同之土壤其物理性未必相同；土壤之含水量測定最為簡單，但土壤含水與其壓實性、硬度等均無一定關係；最後膠體成分之測定，更係一種極困難工作，最近學者研究膠體化學 (colloidal chemistry)，結果益證明膠體在土壤中變化之複雜，斷不能用為分析土壤之根據。縱使以上所述之方法均能一一應用，土壤之行為仍不能豫測，蓋雖在同處之土壤，其礦物成分、水分及膠體成分均不一致。故欲分析一種土壤必須綜合種種試驗而考察其相互關係，加以判斷，然後始能有成功希望。

1927年太沙基稱，土壤分組時至少應測得下列三種物理性：

- (1)土壤因增加壓力所起之體積變化；
- (2)土壤之滲透性；
- (3)土壤之黏性，即在正壓力等於零時土壤之剪力。

太沙基認為如兩種土壤具有同等之可壓性，同等之滲透性，及同等之黏性，則在施壓力時其行為完全相同，不論其物理性是否相同。惟試驗時所用之樣品必須係未經驚動者，蓋土壤之未經驚動與已受驚動樣品之物理性迥異，而未經驚動土壤樣品採集時頗為困難。此外鑑別一處土壤時，必須採取數種樣品，比較其結果，始能得正確之結論。

土壤分組之種種困難已如上述，但在公路工程上欲畫分路基土壤則較為容易，蓋路面上所承載之壓力不及房屋橋樑基礎所承載者之大，且路面之靜重較小，土壤之凝實度亦較微，故預測路基土壤之行為較預測建築物基礎下土壤之行為為易。

第一節 路基土壤分組

1929年太沙基綜合土壤物理學家、地質學家、農林家、化學家及公路工程司之研究結果，發表土壤分組報告。太氏路基土壤分組法之特點在能表現土壤在車輛行駛狀況下，及不同氣候狀況下之行為。其優點在能直接答覆一般公路土壤問題；例如“何種土壤行為對於公路設計、建築及養護有關？”由分組表中可直接知某組土壤只有在潮溼氣候時能穩定，某組土壤只有在乾燥氣候時始能穩定。故太氏分組中分別具有易於霜凍之土壤，不易霜凍之粗料，有彈性之土壤

以及可壓性土壤等地位。在易於霜凍之土壤中更具有種種區別，例如能以改善排水解決者，能以澆油類或其他不透水材料解決者。總而言之，太氏分組法之最終目的在使每組土壤代表一種土壤行為及其改進法，以及鋪路面時應具之條件。

第二章所述之土壤基本物理性，及第五章所述之各種土壤基本實驗，均為土壤分組時之根據。其關係可簡列如下：

液性限度……………土壤之毛細作用。

塑性指數……………土壤之黏性。

離心含水當量……………土壤之毛細作用、可壓性及滲透性之合併作用。

收縮限度……………黏性與抵抗凝固性之合併作用。

野外含水當量……………毛細作用與黏性之合併作用。

體積變化與線狀收縮……………毛細作用、黏性與抵抗凝固性之合併作用。

由以上實驗結果與物理性之關係再參照以實地情形，始可達到分組目的。蓋實驗室測驗結果不過說明土壤在假定環境下之物理性變化，故僅能鑑別其物理性及使之改變物理性應加之處治。實地情形與實驗室連繫愈密，則實驗結果愈能解釋路基土壤之行為。此所以用實驗結果解釋含粗料土壤較解釋含細料土壤為正確也。例如實驗結果證明某種土壤無收縮性與塑性，其顆粒級配均勻（well graded），僅含有少量粉沙，則以該土壤建築路基必甚穩固，無須更從事實地調查。反之，若某種土壤含細料如黏土、粉沙等較多，則實驗結果未必能完全代表路基行為（subgrade performance），必須用實地

調查結果補充之。

是以土壤之分組，對於實驗室測驗結果，與實地調查情形，均應注意。至於實驗室測得結果究竟能代表路基之行爲至何種程度，或在某種情形下，同一實驗結果之土壤能否有不同之路基行爲，當於下節論之。茲將均一路基土壤 (uniform subgrade soil) 依最顯著之特性序列先後，分爲八組如下：

A-1 組 此組土壤含有粗細材料，級配均勻，並具有極佳之結合料 (binder)，無論潮溼情形如何，載重時極爲穩定，爲最佳之路面、路基及填土材料。

A-2 組 此組土壤與 A-1 組略同，惟級配不甚均勻，結合料之品質較 A-1 組略遜。此組土壤可分爲脆性與塑性二種；脆性組之塑性較低，塑性組之塑性則較 A-1 組爲高。脆性組需要毛細壓力供給其黏性，故潮溼時甚爲穩定，長期乾燥則易於鬆動而起塵土。反之，塑性組在較乾時類爲穩定，若雨水過多，路基存水不能蒸發，則甚易軟化。

A-3 組 此組土壤僅含有粗料，而無結合料，載重時不穩定，但不受潮溼影響，不致發生霜凍作用，亦不致發生大量收縮或膨脹，對於柔性路面 (flexible pavement) 或較薄之剛性路面 (rigid pavement) 之承載情形極佳。

A-4 組 此組土壤係粉沙質，缺粗料及黏土，乾燥或微溼時極爲堅固，荷重除去後回彈甚微。在潮溼天氣極易吸收水分，隨即失去其穩定性 (stability)。此組土壤因霜凍作用，易使路面破裂，其承載力亦甚微。

A-5 組 此組土壤與 A-4 組相以，但載重時極易發生形變，荷重除去後回彈亦甚大，彈性作用使路面在建築時不能壓實，建築後亦不易保持黏結狀況。

A-6 組 此組土壤係黏土質，無粗料，但黏性甚強，乾燥時極為穩定，載重時形變甚緩，荷重除去後回彈亦甚微，惟極易吸收水分而發生膨脹，甚而至入液性狀態，浸入路面罅隙中，使路面破裂，或使填土崩坍。

A-7 組 此組土壤與 A-6 組相似，惟含黏土之量較多，載重時極易發生形變，荷重除去後回彈性亦甚大，與 A-5 組相同，潮溼時所起之體積變化較 A-6 組尤甚。

A-8 組 此組土壤含有多量有機質之極軟土壤，若不預先加以壓實，或更換以其他土壤，不能支承路面。

上述之八組土壤均屬於均一支承 (uniform support)，非均一支承 (non-uniform support) 土壤亦可分為三組，如下：

B-1 組 此組土壤為不均勻之天然地面，其由來不外三種：

(1) 在土壤上層上所起之急驟變化，如在沙土質土壤中之黏土窩 (clay pocket)。

(2) 土壤結構上所起之急驟變化，如由勁性土壤驟變為軟性土壤，或由鬆組織驟變為緊組織。

(3) 土壤斷面上所起之驟然變化，如圖 45， a 與 a' 部分表示黏土， b 部表示沙土， c 部表示粉沙。

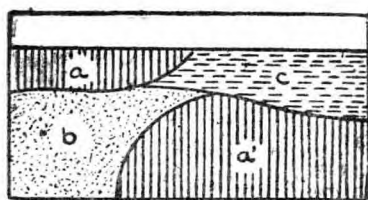


圖 45. 土壤斷面變化

B-2 組 此組不均勻之路基，係由於不均一之填土成分。

B-3 組 此組不均勻之路基，係由於一部分天然地面，一部分人工填土。

非均一路基在公路建築上較為少見，其由於天然者更不多見，故不更詳述。

第二節 各組土壤之特性

前節敘述八組土壤時，曾引用黏土、粉沙與沙土等名詞。該名詞不但表示其顆粒尺寸，且表示其普通物理性。鑑別一種土壤時不但應注意其顆粒尺寸，且應注意其物理性。例如有甲種粗粒沙土，其級配為通過 #20 篩，留於 #100 篩，按第 68 頁之規定該土壤為沙土質。由物理性方面觀之，該土壤所成之路基甚為穩固，更不具有損害性 (detrimental) 之毛細作用或彈性。綜合機械分析與物理性實驗結果可斷定該土壤係屬於 A-3 組。同時有乙種土壤含有大量雲母，其級配亦為通過 #20 篩而留於 #100 篩，若按第 68 頁之規定該土壤亦係屬於沙土質，但考察其物理性則不然。該土壤具有毛細作用與彈性，並無黏性，故在分組時應將該土列入 A-5 組，而不應列入 A-3 組。按此理論，沙土、粉沙與黏土之定義應為：

沙土 其顆粒應在 0.05 至 2.0 公厘並應具有 A-3 組土壤之特性，即具有內阻力，無黏性，更無損害性之毛細作用。

黏土 其粒徑應在 0.005 公厘以下並應具有 A-6 組或 A-7 組土壤之特性，即具有甚大之黏性，毛細作用，而無內阻力與彈性；或具有甚大之黏性，毛細作用及彈性而無內阻力。

粉沙 其粒徑應在 0.005 至 0.05 公厘並應具有 A-4 組土壤之特性, 即具有內阻力, 甚大之毛細作用與彈性而無黏性。

圖 46 係用圖解表示八組土壤與五種基本物理性之相互關係。圖中心之 A-3 組土壤表示最高內阻力, 由中心至外, 內阻力漸減, 至



圖 46. 路基土壤特性圖解

圈邊漸趨消滅。若由圓週之下端循圓週向上, 表示土壤可由可壓性漸變為彈性。

若加可壓性土壤於 A-3 組沙土中, 則能使之漸變為無塑性之 A-2 組土壤, 次變為級配良好之 A-1 組土壤, 更次變為具有塑性之 A-2 組土壤, 最後變為 A-4 組或 A-6 組土壤。同理, 若加彈性土壤於粉沙中, 則成 A-5 組土壤, 加彈性土壤於黏土中, 則成 A-7 組土壤。若加大量彈性土壤於粉沙及黏土中, 則成 A-8 組土壤。

各組均一路基土壤與物理性之關係, 可用表 14 簡單表明之:

表 14.

物理性 組別	內 阻 力	黏 性	收縮與膨脹	毛細作用	彈 性
A-1	高	高	無損害性	無損害性	無損害性
A-2	在某種情況高	在某種情況高	有時具損害性	有時具損害性	有時具損害性
A-3	高	無		無損害性	無損害性
A-4	高低不定	甚 微		作用重要	無
A-5	高低不定	甚 微		作用重要	甚 強
A-6	低	含水少時甚高	恆具損害性		無
A-7	低	含水少時甚高	恆具損害性		有
A-8	低	低		具有損害性	具有損害性

第三節 各組土壤之鑒別

圖 47 為土壤鑒別圖(soil identification chart),表示液性限度與塑性限度、收縮限度、野外含水當量及離心含水當量等四種物理性之關係。已知路基土壤之行爲,用圖可鑒別土壤應屬於何組,或已知路基土壤係屬於某組,可用圖預測其行爲。圖更可用爲研究加物理或化學混料於土壤中所生之變化。各組土壤之級配及其常數如下:

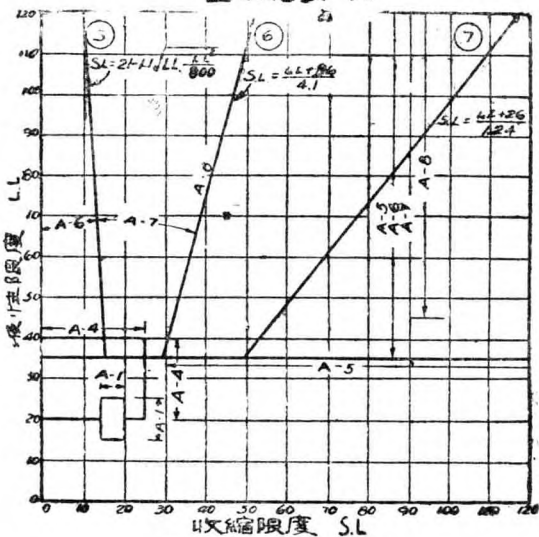
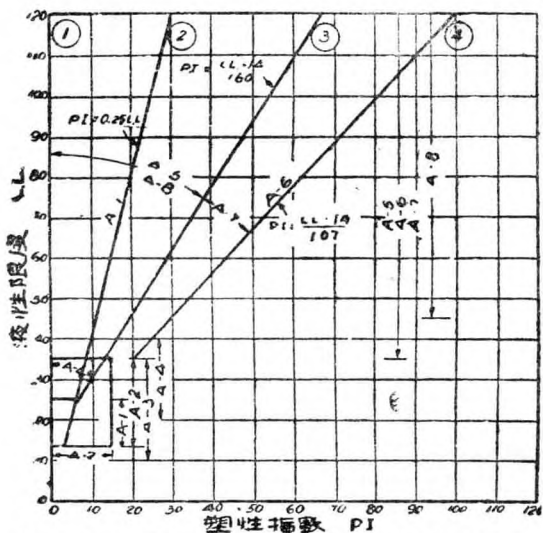
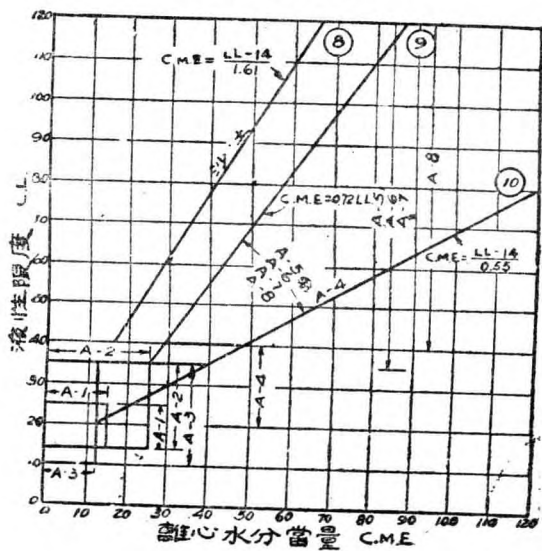
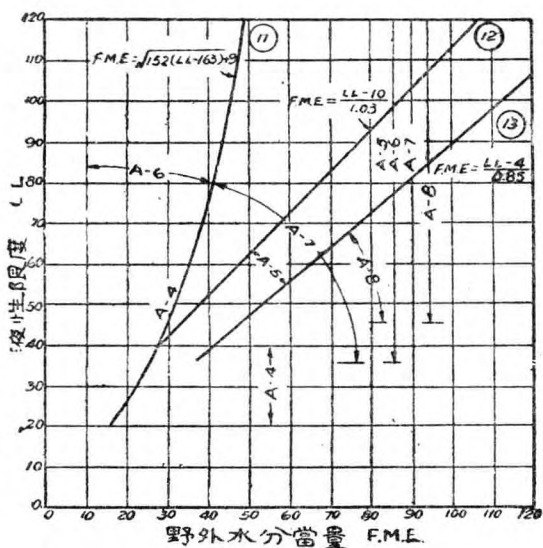


圖 47. 路基土壤鑑別圖



A-1組:

級配: 留於 #10 篩者不過 50%, 土壤膠漿 (soil mortar) 即通過 #10 篩者, 含有黏土 5% 至 10%, 粉沙 10% 至 20%, 各種沙土 70% 至 85%, 粗沙 35% 至 50%。平均有效尺寸 (effective size) 為 0.01 公厘, 其均勻係數 (uniformity coefficient) 大於 15。

常數:

液性限度大於 14, 小於 25。

塑性指數約等於圖 47 曲線(2)所示, 恆小於 8。

收縮限度鮮有小於 14, 大於 20 者。

離心含水當量恆小於 15。

A-2 組:

級配: 土壤膠漿所含之沙土, 不得小於 55%。

常數:

液性限度小於 35。

塑性指數等於零時, 收縮限度才顯著。塑性指數在 0 與 15 之間時, 收縮限度有時顯著, 有時不顯著。

離心含水當量在 25 以下。

A-3 組:

級配: 有效尺寸恆大於 0.10 公厘。

常數:

液性限度不致於超過 35 過多。

塑性指數等於零。

收縮限度不顯著。

離心含水當量小於 12。

液性限度在 10 與 14 之間表示海濱沙或其他易於滑轉之圓形沙。液性限度在 30 與 35 之間表示不易滑轉富於稜角之粗沙。液性限度小於野外含水當量表示沙土係因達半飽和狀而流動。液性限度等於野外含水當量表示沙土係因受水壓上升(hydrostatic uplift)而流動。液性限度大於野外含水當量表示粗糙沙土僅能在凝實度小於野外含水量之狀況下流動。

A-4 組:

級配: 含沙量小於 55%。

常數:

液性限度恆大於 20, 小於 40。

塑性指數小於曲線(3)所示之值。

收縮限度小於 25。

離心含水當量約等於曲線(10)所示, 其值在 12 與 50 之間。如大於液性限度, 表示土壤遇水時極不穩定。

野外含水當量等於或略大於曲線(11)所示, 最大不過 30。

收縮限度超過 20 或接近曲線(6)所示之值時表示土壤之膨脹性驟增。特別在野外含水當量超過離心含水當量時膨脹增加為甚。

A-5 組:

級配: 含沙量小於 55% (偶有例外)。

常數:

液性限度恆小於 35。

塑性指數鮮有大於曲線(3)所示之值。

離心含水當量大於 12, 恆在曲線(9)與(10)之間, 不常具積水現象(偶有例外)。

收縮限度大致大於 30, 不宜大於 50。如粉沙中含有泥炭, 收縮限度之值恆近於曲線(6)所示, 野外含水當量之值恆近於曲線(12)所示。如粉沙中含相當數量之硅藻或雲母, 則收縮限度之值恆近於曲線(7)所示, 野外含水當量之值恆近於曲線(13)所示。

A-6 組:

級配: 含黏土量鮮有在 30% 以下者。

常數:

液性限度恆大於 35。

塑性指數約等於曲線(4)所示之值。

收縮限度不致於較曲線(5)所示之值超過過多。

離心含水當量常具積水現象, 其值恆在曲線(9)與(10)之間。

野外含水當量不致於超過曲線(11)之值, 但如係膠體土壤, 則其值或將遠小於曲線(11)所示。體積變化大致均超過 17。

A-7 組:

級配: 含黏土量鮮有在 30% 以下者。

常數:

液性限度恆大於 35。

塑性指數之值在曲線(3)與(4)之間。

收縮限度之值恆在曲線(5)與(6)之間。

離心含水當量之值在曲線(9)與(10)之間, 積水現象雖在高含水當量之土壤亦未必有。

野外含水當量較曲線(11)所示之值為大。

收縮限度較低, 野外含水當量較高之土壤表示其含有有機質膠體, 較高之收縮限度表示土壤易於起霜脹作用。

A-8 組:

級配: 無規則。

常數:

液性限度大於 45。

塑性指數恆小於曲線(3)所示之值。

收縮限度約等於曲線(6)所示之值。

離心含水當量之值在曲線(9)與(10)之間。

野外含水當量之值可能超出曲線(12)所示之值。

離心試驗時如有積水現象, 表示係腐泥土, 含有黏土與膠體; 如無積水現象而具高含水當量, 表示土壤係風化未久之泥炭土。

表 15 及 16 為各組標準土壤之機械分析與物理性:

表 15. 小於 2 公厘各組標準土壤之顆粒徑

組 別	大於 2 公厘 顆粒	粗 沙	細 沙	粉 沙	黏 土	膠 體	通 過 #40 篩
A-1	0	54	27	12	7	5	62
A-2	0	54	19	14	13	7	60
A-3	0	91	9	0	0	0	79
A-4	0	0	3	57	40	15	100
A-5	0	0	21	48	31	14	98
A-6	0	4	11	24	61	44	99
A-7	0	4	10	39	47	33	100
A-8	0	5	21	54	20	8	100

表 16. 通過 #40 篩各組標準土壤之物理性

組 物理性 別	液性限度	塑性限度	收 縮		含 水 當 量	
			限 度	比 率	離 心	野 外
A-1	22	2	18	1.7	11	9
A-2	26	7	18	1.8	17	24
A-3	21	0	29	1.5	2	26
A-4	34	14	20	1.8	28	27
A-5	72	27	54	1.1	61	64
A-6	79	60	10	2.0	30	23
A-7	54	27	24	1.6	40	35
A-8	51	8	34	1.3	34	45

第四節 路基土壤分組之應用

前節所論之土壤分組法，可應用於基礎建築、填土工程、公路工程及飛機場建築等；其中以公路工程應用最爲顯著，茲分述如下：

(一)基礎工程 最適宜於基礎建築之土壤，爲 A-1 組至 A-4 組，其次則爲塑性較小之 A-5 與 A-7 組。至於 A-5 與 A-8 組以及塑性較大之 A-6 與 A-7 組均不宜於基礎之建築，應加以處治。

基礎建築時不但應注意土壤之沉陷 (settlement) (不平均沉陷尤爲危險)，並應注意土壤之旁面流動。蓋基礎設計時，不但應計算其承载力，並應計算其旁面壓力，其作用有如護牆 (retaining wall)。故護牆建築時，若遇 A-8 組或塑性較大之 A-6 與 A-7 組土壤時，應特別注意此點，以免護牆填土時，下部土壤發生流動而致崩潰。

(二)填土工程 普通 A-1, A-2, A-3 與大部分之 A-4 組土壤均爲良好填土材料，不必運用特別壓實法，此種土壤亦適宜於堤壩之建築。塑性較大之 A-4, A-6, A-7 各組土壤則必須引用特別壓實法 (見第十一章)，始能用爲填土材料。至於 A-5 與 A-8 組土壤，塑性大之 A-6, A-7 組，及不穩定之 A-4 組則均不宜用之爲填土材料。萬不得已時用之，亦應經過嚴格之壓實處治，庶不致發生危險。

(三)公路工程 路基土壤之性質直接影響及路面之穩定，剛性路面之彎性，路面厚度之設計，路面伸縮縫之設計，路肩、路面底層及路基排水等設計。以下述各組土壤應加之處治。

A-1 組 應先多加水使完全潮溼，再用羊蹄轆 (sheepfoot or tamping roller) 滾壓，應加地下水排水設備，使地下水水位降低，以

防霜凍作用。此組土壤為鋪築級配沙石路面 (stabilized soil road) 之理想材料，若能加以潮解化學物 (deliquescent chemicals) 之處治，結果更好，無需鋪路面底層。

A-2 組 應加水滾壓，一如 A-1 組。應加排水設備以防霜凍作用，及毛細管水上升，軟化土壤結合料。如土壤具塑性，收縮性低，所含粗料少，則應加粗顆粒材料調和之，如礫石、煤渣、碎石等。在乾燥情形下可用為底層材料，或加潮解化學物用為路面。如土壤具有高收縮性，則可加石灰、硅藻等材料，以減少土壤之空隙，或加瀝青材料 (bituminous materials) 或洋灰以減少土壤之吸水量。

A-3 組 無須排水設備，以結合料或稀瀝青材料拌和，可用為路面面層。即使不加處治，仍不失為相當穩定之天然路面。

A-4 組 應灑以少量水，用重壓路機，往返滾壓之。應加排水設備以截除滲透水分，並防止霜凍作用。若於土壤中拌入黏性材料，再加瀝青材料一層，然後於其上鋪碎石路面，或可得優良結果；不然，則勢必挖去起霜凍作用之土壤，更易以不起霜凍作用之材料 (non-heaving materials)。排水設備不困難時，可鋪混凝土路面，(concrete road) 中間厚度 6 吋，邊厚 8 吋；或鋪碎石路面，其厚度則視土壤是否預先加過處治，至少需 6 吋。

如地下水位過高，人工排水不可能時，不宜鋪築碎石路面，應鋪厚混凝土路面，中間厚度 7 吋，邊厚 9 吋，並應加嵌鋼筋以防破裂。澆油處治 (oil treatment) 於此組路基不易見效，因水係由下而上也。

A-5 組 應先將土壤翻動拌和，使有均一密度；不然，滾壓後將

起不均一之回彈作用。排水設備與應加之處治與 A-4 組無異，惟碎石路面不適用於此組路基，除非先有完善之排水與土壤處治。

A-6 組 應加極完善之滾壓，用機械翻動土壤有益於均勻滾壓。此組路基依土壤情形可分為不透水者（土質均勻）與透水者（具有裂縫與孔根）。

均勻狀況 (homogeneous)，可採用厚碎石路面或剛性路面以供廣大荷重面積，所需分布面積之大小，因土質之鬆軟程度而定。路面表面處治可防止土壤侵入柔性路面之底層中。路面酌加裂縫控制 (crack control)，可減少路基收縮不均之患。透水狀況，排水可能時，可採用碎石路面或剛性路面。透水狀況，排水不可能時，可採用極堅固之碎石路面，或用具有裂縫控制之剛性路面。可酌加粗料於路基中，以減少霜凍作用。

填土地段，可加粗料於填土中以穩定之。填土應在夏季乾燥時施工。若在路基中發現泉源，應即引去之。澆油處治可減少土壤被雨水所飽和之危險。

A-7 組 需用機械翻動土壤 (mechanical manipulation) 以防止不均勻膨脹。重壓路機滾壓，不特無益，反而有害。應具排水設備，使土壤中水分得以排出。在新澆混凝土時應在路面下鋪柏油紙 (tar paper)，防止下部土壤之膨脹。其他處治法則與 A-6 組相同。

A-8 組 應將不良土壤除去，易以粗粒土壤，必要時可採用轟炸法排去不良土壤。欲使毛細作用不影響及路基，地下排水溝，應埋在路基下，至少 10 呎深。至於最有效之處治辦法，至今尚未有所發現。所鋪路面應具有抗彎力 (bending resistance)，更應充分設置裂

縫控制，並嵌鋼筋。

第八章 土壤含水與排水

水之作用在土壤學上，占有極重要地位。土壤之含水影響及其物理性，如收縮、膨脹、黏性、冰點等；因之連帶影響及公路建築，如路面破裂、路基沉陷、邊坡坍塌、填土崩潰等，莫不因水在其中醞釀而成。與土壤接近之水分大約可分為游離水與吸附水 (absorbed water) 兩種。游離水多時則聚於地下成為層次，稱為地下水；少時則藏於土壤孔隙中，稱為毛細水 (capillary water) 或孔隙水 (pore water)。吸附水又稱為溼氣膜 (moisture film)，附着於土壤顆粒上。吸附水與毛細水有關於土壤物理性，地下水則有關於公路排水設計，均在本章討論範圍內。

第一節 土壤含水

直徑大至 $1/40$ 吋，小至 $1/1,000,000$ 吋之水點，懸於空氣中，遠望如雲，近則為霧，在電勢下，水點凝為水滴，直徑大至 $1/4$ 吋，小至 $2/1,300$ 吋，此即土壤含水之由來。土壤含水在飽和時不易分出游離水與吸附水之差別，若用蒸發方式漸次推求，則可知土壤含水由液狀土壤進至固狀土壤間實經過若干過程，塑性限度、液性限度、收縮限度及其他物理現象，均在此過程中發生。

取少量土壤調於水中，攪動之使成懸置態，靜止後土壤顆粒漸漸沉澱於容器之底，此時土壤之含水極高，可稱為液狀土壤。土壤在液狀時其游離水與吸附水之比例懸殊甚遠，事實上游離水完全控制

土壤之穩定性，土壤顆粒浮盪於游離水中，溼氣膜則包裹於土壤表面，有如橡皮薄膜。

蒸發容器，使土壤含水減少，則顆粒間發生表面張力，顆粒與顆粒間互相吸引，漸趨接近，此時現狀可稱為黏流狀土壤（viscous state），不復為液狀矣。在此狀況下土壤最低之含水量為土壤之液性限度，繼續蒸發，土壤密度漸增，成塑狀，不復流動，游離水與吸附水之比例亦漸趨接近，吸附水漸居主動地位。

更繼續蒸發，至土壤抵抗壓力與表面張力之收縮力達到平衡時為止，亦即土壤之收縮限度；收縮限度達到後土壤不復收縮矣。此時土壤已進入固體狀，繼續蒸發不能變動土壤之體積，而使留於空隙中少量孔隙水逸去，所餘者僅有一層包於土壤表面上之固化溼氣膜（solidified moisture film）。此溼氣膜具有固體性，極為堅韌，不易除去，此所以土壤乾後不成粉狀，而能保持塊狀。

若以圖解表示土壤含水分布，大約可成圖 48 所示，固化水（solidified water）與黏性水（cohesive water）為組成土壤溼氣膜之主要水分。毛

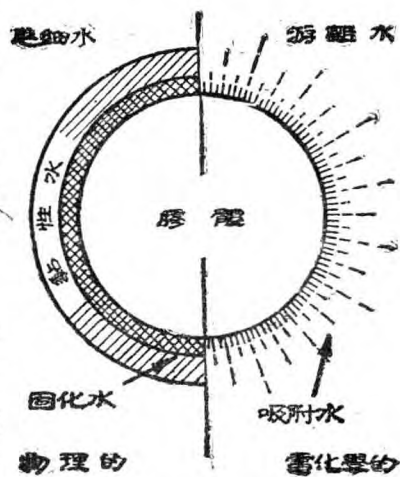


圖 48. 土壤含水之種類

細水則環繞於溼氣膜之外。以下分述溼氣膜與毛細水及土壤之關

係：

溼氣膜現象 欲明瞭溼氣膜現象，必須先明瞭溼氣膜與毛細水之區別。溼氣膜係指堅固附着於土壤上之水分，與土壤結合成一體不易分開，亦可視為土壤之一部。毛細水則係指土壤中溼氣膜以外之水，恆存留於土壤孔隙中，若僅藉重力或壓力不易除去之。溼氣膜最外一層水分雖與毛細水相似，不易區別之，但其作用則迥然不同。前者附着於土壤上之力甚強，其吸附力不受普通壓力之影響，後者在飽和狀態下，若施以壓力，則孔隙中之水分，可由高壓力方向流向低壓力方向，太沙基曾試加壓力於黏土質土壤上，以除其含水使達到收縮限度，試驗結果所需之壓力高至每平方呎 339 噸，可知溼氣膜附着於土壤上之堅韌程度。

上述以蒸發方式可除去大部分溼氣膜中之黏性水與固化水，此部水分在實驗中則稱為收溼含水與收縮水 (shrinkage water)。收

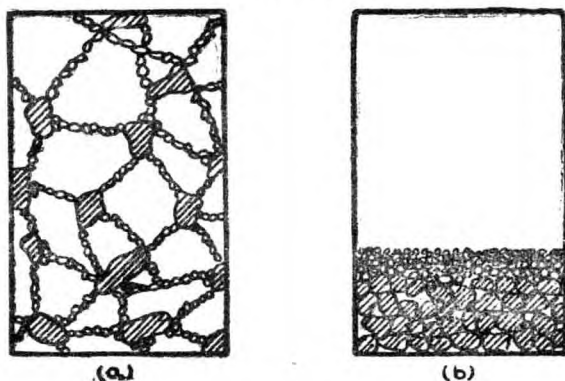


圖 49. 羊毛狀與非羊毛狀土壤

溼含水係土壤吸取自空氣中之吸附水，結合於土壤上極為堅固，通

常以土壤在空氣中(約 20°C)晾乾之含水,與在 110°C 爐內烘乾時含水之差表之。乾沙曝露於空氣中,其體積有時增加至25%,即由於乾沙吸收空氣中水分,其收溼含水成分達6至8%。

收縮水亦係吸附於土壤顆粒表面之土壤,實際上包括有一部分之收溼含水。收縮水除去後土壤體積立即起急驟變化,此種現象在不起羊毛狀(deflocculated)土壤或無結構土壤尤為顯明。羊毛狀土壤之結構有如蜂巢,其中充滿水分如圖49(a)。實際上此種土壤恆在飽和狀況下。不起羊毛狀土壤顆粒間僅有溼氣膜隔離之;羊毛狀土壤顆粒則隔離甚遠,浮盪於空隙水中。加壓力於羊毛狀土壤或攪動之,則其蜂巢狀組織破裂,土壤呈過飽和狀況,剩餘之水係屬於孔隙水或游離水,可用壓力除去之,與吸附水不同。此時土壤體積雖大減,但與收縮水所起之變化不同,不可混為一談。

毛細水現象 毛細現象已於第二章第三節略有論述。在此所論者為毛細水在土壤中流動情形,及其與重力水(gravitation water)之區別。如前節所述,毛細水係游離水或孔隙水被吸附溼氣膜所吸引,上升高出於水面,

藉表面張力支持以相當之距離,其上升之現象稱為“毛細上升”。

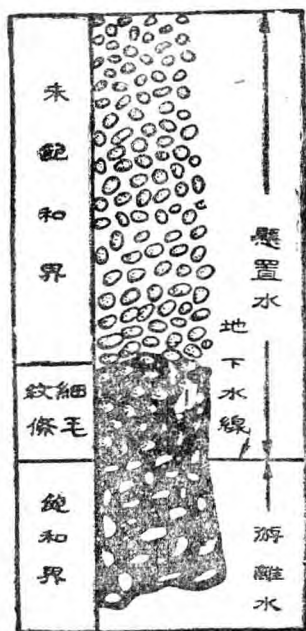


圖50. 毛細條紋現象

(capillary rise), 其受毛細管溼潤而高於水面之地帶, 稱為“毛細條紋”(capillary fringe), 亦即土壤之未飽和界與飽和界間之交接地帶, 如圖 50. 毛細上升高度之計算法如下:

設 ST = 表面張力, 單位為達因/公分;

d = 管之直徑, 單位為公分;

α = 液體與管壁接觸所成之角;

h = 毛細上升高度, 單位為公分;

D_1 = 液體之密度;

g = 地心吸力之加速度, 單位為達因.

液體在圓形毛細管所受向上之力為 πdST , 所受向下之力為 $0.7854 d^2 h D_1 g$, 兩力適相等, 故

$$h = \frac{4ST \cos \alpha}{d D_1 g}$$

水於純潔之玻璃管上之表面張力, 在 0°C 為 75.6 達因, 在 25°C 時為 72.1 達因. 故若以 0°C 為標準, 且 $\cos \alpha$ 及 D_1 之值在平衡時, 約等於 1, 則任何管徑之毛細上升可由下式計算之:

$$h = \frac{4 \times 75.6 \times 1}{d \times 1 \times 980} = \frac{3.09}{d} \text{ 公分.}$$

測量土壤毛細作用之方法, 以研究其滲透性着手較為簡便. 已如第二章第三節所述, 由其中之公式測得 K 之值, 事實上包括有由於毛細水之滲透係數與由於重力水之滲透作用兩種. 惟後者之數量甚少, 復因土質不同而異. 下表 17 為三種不同土壤之滲透係數.

表 17.

樣品號目	固體體積 %	水之體積 %		滲透係數 K (呎/日)		
		實驗之始	實驗之終	毛細	重力	總計
1	54	0	36	0.163	0.027	0.190
1	56	36	43	0.052	0.023	0.055
2	40	0	49	0.708	0.082	0.850
3	49	0	51	0.368	0.029	0.397

第一號樣品係粉沙質壤土，乾時滲透係數為每日 0.190 呎，其中 86% 係由於毛細作用，14% 由於重力。在半飽和狀況時其滲透係數則減至每日 0.055 呎，其中 42% 係由於重力。第二號樣品含有 80% 粉狀石英(ground quartz)，20% 硅藻，具有強毛細作用，在每日 0.850 呎之滲透係數中僅有 10% 由於重力。第三號樣品含有 76% 粉狀石英，19% 硅藻與 5% 本吞耐特(bentonite)。少量之本吞耐特雖未能減少土壤之孔隙甚多，惟滲透速度則由 0.850 呎/日減至 0.397 呎/日，其中只有 8% 係由於重力作用。

土壤毛細作用多寡各不相同，其中以粉沙與沙土之區別最為顯著。表 18 為一種具天然排水性，無霜凍作用之海灘沙，與一種不穩定，具霜凍作用粉沙排水性之比較表。由表所示，在 10 呎厚之粉沙土層中，毛細水占 4.7 呎，同厚之沙土層毛細水僅占 0.1 呎。前者僅留有 0.4 呎為重力水之地位，後者則有 3.4 呎。同時 24 小時內，沙土重力水之流量為 22.5 呎至 65.7 呎，粉沙土則僅有 0.1 呎至 2.4 呎。

由上所述，可知有若干種土壤，具有強毛細作用，其吸收作用能引起土壤或公路路基之崩潰。至於如何防止此種作用，則於下節述之。

表 18.

排 水 性	海 灘 沙	粉 沙 土	
	(呎)	(呎)	
10呎飽和土壤內 {	土壤顆粒	6.5	4.9
	毛細水	0.1	4.7
	重力水與空氣	3.4	0.4
24小時內毛細上升 {	在地下水1.5呎	0.0	5.2
	在地下水3.0呎	0.0	3.0
	在地下水6.0呎	0.0	0.0
最高毛細上升度	0.4	12.0	
	(立方呎)	(立方呎)	
每 24 小時每平方呎毛細水流量 {	在地下水1.5呎		2.7
	在地下水3.0呎		2.0
	在地下水6.0呎		1.0
每 24 小時每平方呎重力水流量 {	1.5呎水頭	22.5	0.1
	3.0呎水頭	39.7	0.4
	6.0呎水頭	65.7	2.4

第二節 地下水

游離水分，因地面上冰雪融解水分藉地心引力而透入土壤，並

充滿於土壤之空隙，及結構鬆弛之沉澱物或巖石中，而構成一定之水平，稱為水面 (water table)。低於水面之地帶為飽和界 (zone of saturation)，其中水分稱為地下水 (ground water)。所謂水面者並非純粹水平面，僅與地面之起伏相類似，並沿襲地面之形勢，經山丘地帶其勢略拱，經山谷之處其勢略傾，且有突出地面之上而成湖沼溼地者。

地下水之種類 地下水因其所處之地位可分為高懸水 (perched water)、游離水、禁閉水 (confined water) 與固定地下水 (fixed ground water)。

高懸水為在水面以上之不透水層所隔離之游離水，如圖 51。高懸水面與普通水面不易區別，尤其是在高懸水面面積廣大時。

禁閉水係潛入不透水層以下之地下水，恆因地位關係引起高壓。自流井 (artesian well) 多係鑽取自禁閉水。

固定地下水係藏於地下，在水面之水而不流動之水分。此項水分若存在於水面之上，則畫入毛細水及吸附水，在水面下，則稱為固定地下水。另有一部分水

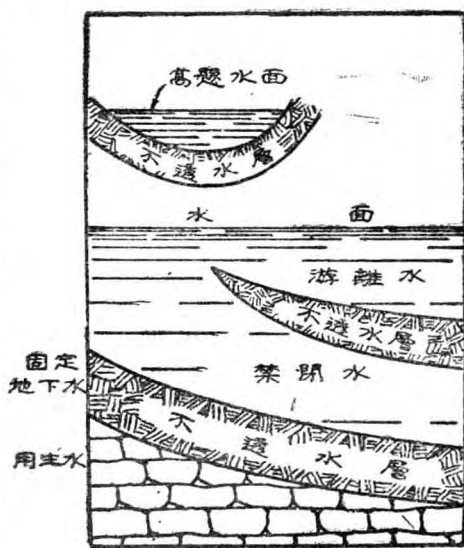


圖 51. 地下水之分類

在巖石生成時即藏於其中，稱為用生水(connate water)。

通常在公路建築中所常見之地下水種類，約可按其方向分為山坡滲水(side hill seepage)與平地水面(level ground water)兩種。第一種山坡滲水，普通在丘陵區及山嶺區路線，常常發現，地下水之方向如圖 52 所示。普通地下水距路面約一公尺至數公尺，其深度約自十公分至一公尺，地下水之方向往往與原來地面平行，由高而下，而受水頭(water head)壓力，故露出地面後湧出頗強，恆在邊溝或

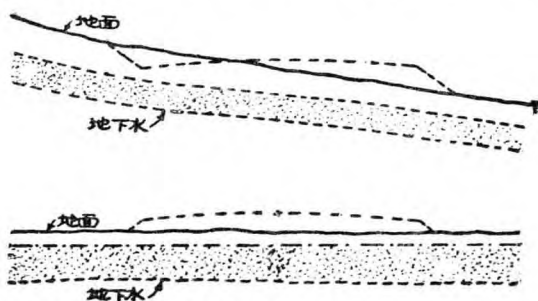


圖 52. 山坡滲水與平地水面

路肩上聚成水塘，同時毛細作用可將地下水吸至路面，侵蝕路基，破壞路面，為害甚劇。

第二種平地水面多發生於平原區，草原低溼地尤甚，如青海及甘肅南部之大草原。此種游離水無水頭壓力，流動性甚小，其水位在乾季時可以降低，在雨季時可以上升，平地水面在公路建築較為少見，地下水百分之九十係屬於第一種山坡滲水。

排水與土質之關係 土 本身往往具有天然排水(natural drainage)作用，其在山嶺區域，土壤多石質，組織鬆動，天然排水情

形極優。工程司對於此種土壤除於雨後表面排水 (surface drainage) 應加處理外，可不必顧及地下排水之設施。富於黏性之土壤則較難處理，然天然對於黏性之土壤仍具有相當排水作用。黏土之天然排水孔道雖小，但經水分之滲透作用，可逐漸增大；他如蟲蟻之鑽鑿，冰雪之膨脹，均可增大其排水孔道。工程司最感困難者厥為山坡地，蓋山坡高處滲透之水分被下層黏土所阻，乃沿坡向下流至窪處，至窪處被水沖而坍塌，在此種情形下，天然排水完全失去作用，必須藉人工之地下排水補救之。

地下排水之目的在降低地下水水面，使公路路基不致受水之侵蝕。至於埋設管溝或加深邊溝對於改進路基穩定程度如何，則不但應視地下水可能降低若干，並應視土壤本身之吸收毛細水之程度而定。有若干種土壤係屬於排水性者 (drainable)，其他則屬於無排水性者 (undrainable)；具有排水性之土壤多係粗粒組織，其顆粒往往大於沙土，且具透水性。不具排水性之土壤則反之。例如 A-1 組土壤排水設施僅能減少其霜凍作用，A-2 組土壤則更能防止水分軟化結合料。至於 A-4, A-5 各組土壤，其毛細上升之力甚強，能使土壤失去其黏性與內阻力。適當之排水設施不但可減少土壤之霜凍作用，且可增進路基承载力。A-6, A-7 組土壤在飽和時失去其黏性，排水設備可增進其穩定性。但以上所述僅限於土壤在透水狀況 (permeable state) 時，若土壤係在不透水狀況，如在深切土處 (heavy cut)，排水設施不易有效。

地下排水之設施 排除地下水之最有效方法為埋設暗溝 (under drain)，暗溝之目的在降低地下水之地位及引出挖土邊坡之滲水。在

下列情形下，路基應具有暗溝設備：

- (1) 路線經過水田、沼澤及卑溼地帶。
- (2) 邊溝面積不能勝任排水量，而又不能加大時。
- (3) 在挖土處或山坡半填半挖處，其邊坡有滲水現象者，暗溝截斷水流使之不易影響路基。
- (4) 路基土壤易於滲水者。

暗溝之形式，普通可分為管溝(tile drain)及盲溝(blind drain)二種。管溝所用之管有瓦管、混凝土管及金屬管等，管之埋設深度至

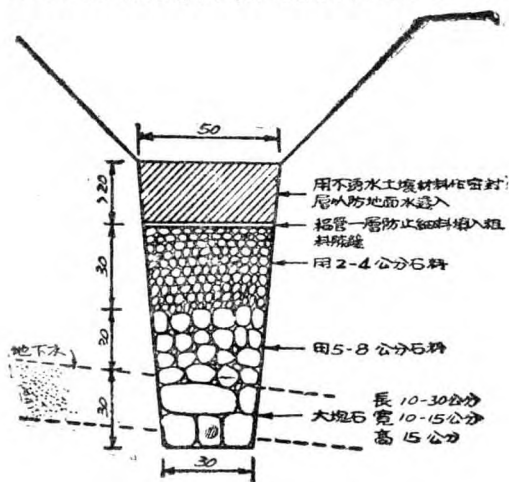


圖 3. 盲溝之構造

少應在地面下 10 吋，溝底寬 12 吋，管之週圍用 3/4 吋至 4 吋之碎石填塞夯實，表面用土封密，如圖 53。管溝如設計得當不易淤塞，為建築暗溝最妥善之辦法，惟管溝費用過巨，在經濟不甚充裕之公路可改用盲溝，盲溝之構造如圖 53。設計盲溝時應注意下列各點：

(1) 邊溝應具有均勻坡度，不得小於 0.3%，最大不得超過 2%。

(2) 流入盲溝之水所經距離不宜過長，每隔相當距離須有適當出口。

(3) 在邊溝設計之先，對於路線經過地段之排水面積，挖土邊坡，路基土壤及地下水水面均須加以研究。

暗溝之位置及其深度 普通地下水流，以山坡滲水情形最為常

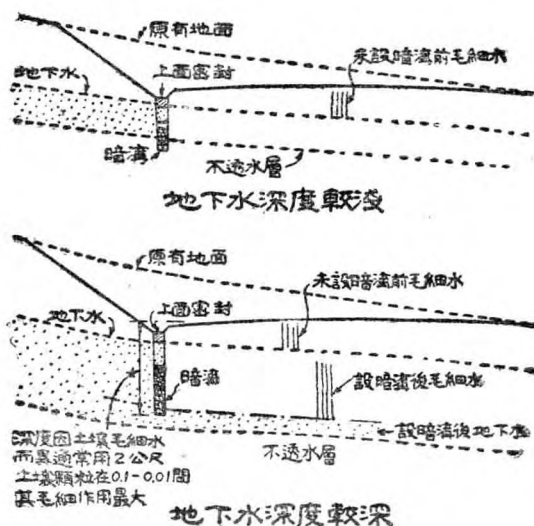


圖 54. 山坡滲水情形

見，其所異者乃其水層距離路面之遠近及其水層之厚薄，各有不同，因之設計之方法亦各不同，如圖 54 甲種情形，山坡滲水層距路面約 1 公尺，其厚度不及 30 公分，乙種則距路面約 2 公尺，其厚度約為 1 公尺，甲乙二種情形，其排水設備之設計完全視其路基土壤性質如

何為根據。蓋毛細作用最能防礙路基而影響路面之安全，故路基排水是否需要，必須察看毛細管之吸引力是否能到達路面之下而定。例如圖 54 中乙種情形與甲種情形並無二致，但在乙種情形下，其山坡滲水層底端距路面約 2 公尺，其厚度約 1 公尺，為防止毛細吸升高度影響路面起見，暗溝深度之設計，必須視土壤之毛細性質始能決定之，但普通土壤如能使山坡滲水層頂端降下至距路面約一二公尺，必可無慮。

縱向滲水層 以上所述均屬橫向滲水情形，山坡滲水亦有縱向情形，如圖 55。圖中路基因受水侵蝕而致路面破裂，已足顯示一切。此種縱向滲水(longitudinal seepage)較之橫向滲水，其為害程度實

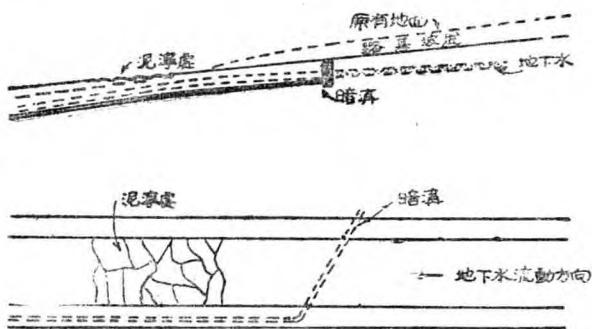


圖 55. 縱向滲水暗溝設計

有過之而無不及。良好路面因此破裂者為數甚多，尤其在填挖土方交接處最易使地下游離水層曝露於上，在雨季之際，路基被水浸軟，路面無堅固基礎自易破裂。補救之方法非設暗溝不足以宣洩之。

平地水面之處理 在上述數節中，僅限於山坡滲水情形，若平

地水面之處治，其原理亦大同小異，惟處治之方法較山坡滲水尤為困難，蓋往往泉源深入地下，導引路外，恆難得一適宜之出路。路基之穩定與否，須視地下水深度及土質毛細作用之大小以為根據。例如地泉深在地下，路基土質雖有毛細作用，但其吸升高度並不影響路面之安全，則此種地下水並不為害。若地泉雖深在地下，而土壤毛細吸升高度可以影響於路面之安全，則必須降低地下水之位置，而使毛細作用不生影響，方足無虞。由此觀之，處治平地水面於路基土壤關係最大。倘地下水面過低，如再降低其位置，困難必多。如此而欲求路面之安全，則只有改善路基土質一法。

總以上所述，吾人知鋪築路面有如建築房屋，應有不漏水之屋頂與不潮溼之地腳，上防雨雪之侵蝕，下防毛細水之蔓延。路面本身雖良好，若路基被水浸淫，則路面斷無持久之理。低價路面 (low cost road) 對於此點應與高價路面加以同樣注意，往往見養路工人年年翻修同一地段路面，仍不能見效，蓋其失敗原因不在路面而在路基，若能將路基存水排出，路面自不成問題。

第九章 霜凍現象

土壤含水於氣溫降低時起霜凍作用，此種作用對於公路建築極關重要。在北方天氣寒冷地帶，冬季地凍，其深度每達三四呎，甚者達六呎。霜凍時土壤中水分起膨脹及其他作用而隆起 (heave)，小則破壞路面，大則阻礙通車。

據工程新聞紀錄 (Engineering News-Record) 雜誌記載，在 1927-1928 年冬季，美國公路因霜凍所蒙之損失約為卵石路每哩 50

元，碎石路每哩 100 元，混凝土路每哩 150 元。渥海渥州 (State of Ohio) 在一年中因霜凍損失達 250,000 元，馬恩州 (State of Main) 單就修理費計算已達 500,000 元，此外因交通斷絕所受之間接損失尙未計入。在西伯利亞公路霜凍現象尤爲劇烈，有時其力能翻起路面高達 20 呎，破壞力量至爲驚人。我國北方公路可能發生霜凍作用者極多，西南山嶺區域間亦有之，如樂西公路箕衣嶺上公路長十餘公里全屬霜凍作用範圍內，茲分述霜凍作用之起因及防止法如下各節：

第一節 熱傳布

熱之單位有二：C.G.S. 制爲使一公分水由 3.5°C 升至 4.5°C 所需之熱，稱爲一小卡 (gram-calorie)；F.P.S. 制爲使一磅水由 60°F 升至 61°F 所需之熱，稱爲一 B.T.U. (British thermal unit)。

表 19.

材 料	傳 布 係 數 K B.T.U.	材 料	傳 布 係 數 K B.T.U.
乾土壤	10.7	泥炭(乾)	0.35
乾沙土	2.70	洋灰	2.06
空氣	0.174	石子混凝土	6.28
雪(新降者)	0.75	爐滓混凝土	2.35
雪(陳舊者)	3.48	松木	0.75-0.95
水	4.35	鋸屑	0.35
冰(0°C)	14.5	木料(打包)	0.24
沙灘	16.0	棉花(打包)	0.29
花崗巖	16.4	亂瓦	0.25

霜凍作用之所以能深透入路面之下者，係藉物體熱傳布 (heat transfer) 之力。熱傳布之力，因材料而異，表 19 為各種材料熱傳布之係數。

熱力由空氣傳導至土壤之過程，霜凍所需之時間，及絕緣性材料 (insulating materials) 對於霜凍之關係，可用下例說明之。為便

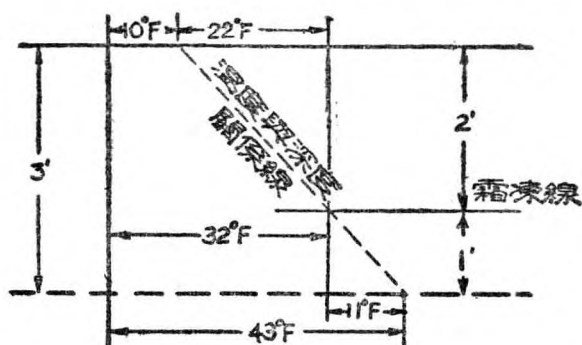


圖 56. 熱傳導與霜凍深度

利計算起見，假定溫度變動與霜凍深度係具直線關係，如圖 56 所示，土層厚 3 呎，溫度由 43°F 降至 10°F，霜凍深度為 2 呎。設土重為每立方呎 125 磅，比熱 (specific heat) 為 0.20，則在 3 呎厚土層內每平方呎表面失熱之數量為：

$$(43 - 26.5) \times 3 \times 125 \times 0.20 = 1,240 \text{ B.T.U.}$$

(26.5°F 為土層底面之平均溫度)。

土壤中熱力消失之速度，應視地面上所鋪絕緣材料之熱傳布力而定。

設 H = 熱傳布量，單位 B.T.U.，

K = 熱傳布係數, 單位 B. T. U.,

A = 受熱面積, 單位平方呎,

d = 受熱面之厚度, 單位吋,

T_1, T_2 = 受熱體之相對面溫度, 單位華氏度數,

t = 時間, 單位小時,

則

$$H = \frac{KA(T_1 - T_2)t}{d}$$

按前例圖 56, 假定平均熱傳布深度為 18 吋, K 之值頗難決定, 蓋土壤之乾溼情形不定, K 之值亦隨之而變, 例如石英質土壤乾時 $K=2.7$, 含水增至 2% 時 $K=10$; 沙土質墟埠乾時 $K=2.7$, 含水增至 25% 時 $K=16$, 含水再增時則水控制傳布係數之值, 因之 K 之值反而減小. 在此暫用 10 為計算之用, 每平方呎表面失熱 1,240 B. T. U., 所需時間可計算如下:

$$t = \frac{1,240 \times 18}{10 \times 1 \times (43 - 18)} = 67.7 \text{ 小時.}$$

各種不同絕緣體蓋於地面上, 可減低霜凍之程度, 新降之雪或未經壓實之雪為良好絕緣體. 上例設地面上蓋有 6 吋厚雪, 則傳熱所需時間為

$$t = \frac{1,240}{(43 - 10) \times 1} \times \left(\frac{18}{10} + \frac{6}{0.75} \right) = 368 \text{ 小時.}$$

若地面上鋪有 6 吋混凝土, 熱傳導所需時間為

$$t = \frac{1,240}{(43 - 10) \times 1} \times \left(\frac{18}{10} + \frac{6}{6.28} \right) = 103 \text{ 小時.}$$

同理，若地面上有雪掩蓋，霜凍之深度由 24 吋可減至 P_1 ，

$$\frac{P_1}{24} = \frac{67.7}{368},$$

$$\therefore P_1 = \frac{67.7}{368} \times 24 = 4.4 \text{ 吋.}$$

若地面上有混凝土鋪蓋，則霜凍深度由 24 吋可減至

$$P_1 = \frac{67.7}{103} \times 24 = 15.8 \text{ 吋.}$$

第二節 霜脹起因

普通物體，遇冷則縮，遇熱則脹，水在 4°C 以上，其體積變化亦係依此定則；惟在 4°C 以下，則若溫度繼續降低，體積反而增大。結冰時膨脹之方向並非向四週上下平均發展，而係向失熱之面膨脹；換言之，即失熱方向與熱傳布方向相反。此現象可用下述簡單實驗證明之：若盛水於花瓶中，凍時水之溫度向瓶之四週平均散失，其體積亦平均向四面八方膨脹，以致花瓶破碎。今設用絕緣體如棉布等，將瓶之四週包緊，使熱量只能向瓶之上方傳散，則凍結後冰只向上方膨脹而不致損壞花瓶。大自然幸有此種現象，湖濱河旁岸地始不致因水流凍時而崩壞，橋樑基礎、堤壩水柵等建築物亦不致被膨脹力而毀壞。當空氣溫度降低時，土壤中所含蓄之熱力，遂漸向空氣發散，土壤溫度亦隨之降低，至到達冰之溫度時，土壤中含水開始凍結，凍結時其體積增大，其方向係向上，因之掀起路面，造成霜脹現象 (frost heave phenomena)。

冰凍時水之體積增大9%，即一立方呎水結成冰後，體積為1.09立方呎，增加155立方吋。含有30%水之土壤，每立方呎於冰凍後體積增加46.5立方吋，膨脹方向全係向上，即等於每呎土壤上升0.32吋。若土壤含有60%水分，於霜凍後將隆起0.64吋。普通霜凍深度不過3呎至5呎，隆起之高度最多不過數吋，而事實上霜脹之程度有至呎許者，遠超過於膨脹單獨所引起之結果，是霜凍作用必不止由於土壤含水之膨脹作用至為明顯。其重要原因經泰卜(Taber)歐姆斯德(Olmstead)悉心研究，始知土壤巨量之膨脹係由於溫度升降不定，土壤中含水由冰聚成冰片而引起。茲詳述於次：

滲透土壤之霜脹 滲透土壤巨量霜脹作用，係由於空氣溫度在冰點下時升降變動，使霜凍線上下移動，如圖57所示。A為未霜凍

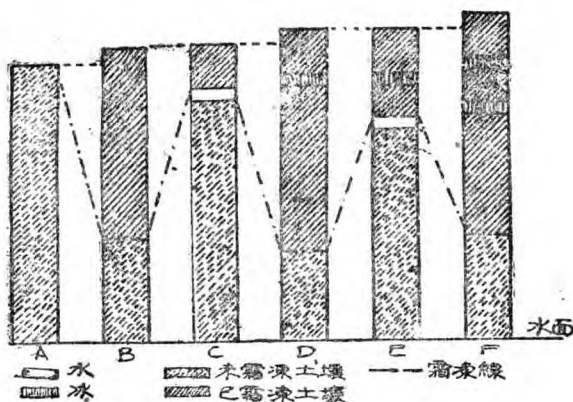


圖 57. 變動霜凍線時所生冰片

之滲透土壤，溫度降低後，霜凍線遂透入土中，如圖中 B。土壤開始霜凍，至膨脹量為土壤中含水部分體積厚度之9%。今若溫度升高，

則一部分霜凍層融解而恢復原有體積，但在層之下裂有一縫，其厚度亦等於融解部分土壤體積之 9%，縫中充滿水分如圖中 C 部。溫度再降，則霜凍復起，裂縫中水分結成冰片 (ice lenses) 如圖中 D 部，如此繼續進行，每次增加霜脹之厚度如圖中 E, F 各部所示。

高度毛細管性土壤之霜脹 高度毛細管性土壤之霜脹作用如

圖 58 所示，其冰層存在於細粒土壤中，根據下述三種物理現象發生霜脹。

(1) 存在於較大土壤孔隙中之毛細水分，可在正常或略低於霜凍溫度，通常為 1°C 至 4°C 時霜凍。

(2) 存在於極小土壤孔隙中之黏性水，能於溫度低於 -4°C 時抵抗霜凍之發生。

(3) 在霜凍過程中，較大水點吸

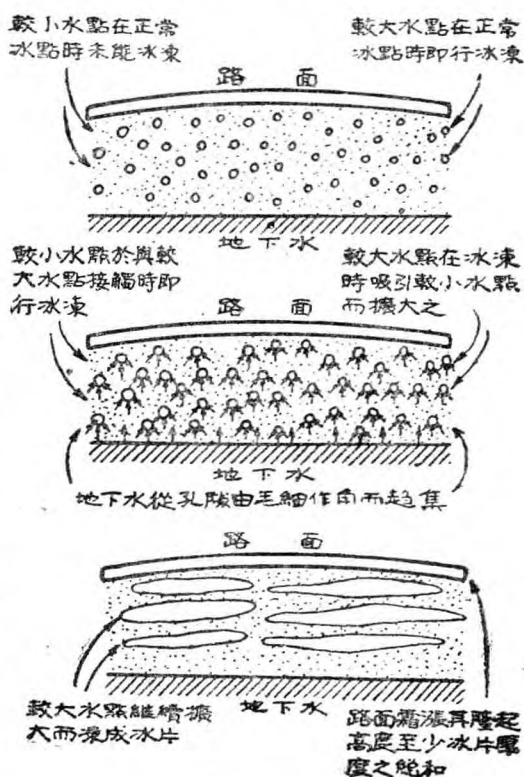


圖 58. 高度毛細管性土壤之霜凍現象

取鄰近較小水點之黏性水，以擴大其霜凍範圍。

按上述三種過程，較大水點繼續吸收較小水點之黏性水，漸聚漸多，成爲冰片，同時地下水不斷供給毛細水之來源，使冰片之厚度不斷增加，終至引起巨大霜脹現象。

細顆粒土壤之霜脹作用多職於此理，至於粗顆粒土壤之霜脹作用則多由於前段所述理由。

第三節 霜凍與土質之關係

由前節所述，知霜凍之起因不外由於氣溫降低與土壤含水量二端。氣溫爲自然事實，茲姑不論；而土壤含水量，則與土質有直接關係。沙土質土壤含水往往由於排水不良，外面水分浸積於其中，使土壤呈飽和狀況。粉沙土質土壤含水則來自毛細水。霜凍作用之程度如何，並非視毛細引力強度，或毛細吸引之速度而定。吾人知水管給水之數量多寡，因水管之直徑、水管之摩擦係數及所施之水壓力大小而變。毛細水吸水之數量亦然；在地下水線上任何一處之毛細水吸水量，由於土壤空隙面積、土壤毛細管摩擦力及毛細引力而變。

毛細壓力大小與土壤空隙直徑成反比例，而毛細管摩擦力則視土壤顆粒之表面面積而變，即空隙愈小，摩擦力亦愈大。故毛細作用最大時，在其空隙直徑之細微程度，足使毛細水上升，而不致受管內摩擦力之阻。換言之，毛細作用愈大，摩擦阻力愈小，則水分吸收愈豐；反之，如毛細作用缺乏，或其摩擦阻力大於毛細作用，則土壤含水量至微，雖遇溫度低降，亦不致有霜凍之虞。故基於毛細作用，土壤可分爲霜凍土壤與非霜凍土壤二種。霜凍土壤又因毛細作用之大小而

有劇烈霜凍土壤與輕微霜凍土壤之別。劇烈霜凍土壤為顆粒自 0.05 至 0.005 公厘，粉沙土質、粉沙黏土、粉沙壩母及粉沙黏土壩母等均屬此類土壤。此類土壤因顆粒甚細，摩擦阻力又微，故最易吸收大量水分，而引起劇烈之霜害。路基如遇此種土質苟不根本剷除，則任何其他方法，均無法阻止霜凍。

黏土質、黏土質壩母、沙土質黏土壩母等，屬於輕微霜凍土壤。黏土顆粒在 0.005 公厘以下，空隙過微，故摩擦阻力頗大，毛細作用不如粉沙之顯着，惟較含有適當之壩母或細沙，而級配狀況均勻時，則毛細作用轉烈，霜凍程度亦因之較深，此類土壤如有完善排水設備，可以完全滅除霜凍之害。

非霜凍土壤為粗沙、礫石、碎石等粗料，其毛細作用為零，含水

表 20。

顆 粒 直 徑 (公厘)	24小時上昇速度 (吋)	最大上昇程度 (吋)	達到最大上昇程 度所需時間(日)
5-2	0.87	1.0	3
2-1	2.13	2.5	4
1-0.5	4.53	5.2	4
0.5-0.2	8.43	9.7	8
0.2-0.1	14.80	16.9	8
0.1-0.05	20.87	41.5	72
0.05-0.02	45.39	78	53
0.02-0.01	19.09		
0.01-0.005	11.22		
0.005-0.002	5.63		
0.002-0.001	2.17		

量不大，為良好之防止霜凍材料。各種不同尺寸顆粒土壤與毛細上升速度及高度如表 20。

根據鉢頓與貝克門(Burton and Benkelman) 在美國密西根州 (State of Michigan) 所作一百五十六個霜凍地段之觀察，其中有九十四處係細組織之粉沙，極細之沙土與粉沙，粉沙質黏土，黏土或沙土質黏土，各類土質之外層均為較粗土壤所包裹，另有二十二處係由黏土包裹之粉沙及極細沙土質黏土，餘三十四處則係較粗沙土。

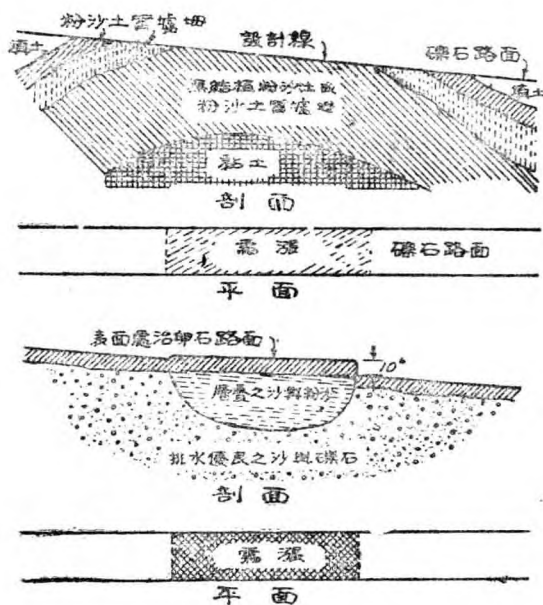


圖 59. 土壤縱斷面對霜脹之影響

公路路線所經過之地域，其土壤絕不僅一種，蓋挖土之深度不一，在一個土壤縱斷面上，能通過數個壤層，加以土壤之天然層次，

土壤之天然窪穴(pocket)等,使一段公路路面往往建築於數種不同土壤上,霜脹作用之程度因土壤性質而異,已如上述,故於一段公路上如有兩種以上之土壤,則勢必起不均勻之霜脹作用,此種現象最爲嚴重,阻礙交通之霜脹多屬於此類,如圖 59 係表示土壤縱斷面對霜脹之影響,前者由於一部分無組織粉沙土所引起之霜脹,後者由於一部分層疊之沙與粉沙土所構成之窪穴而引起霜脹。

第四節 霜凍防止法

防止霜凍之設計,係根據土壤測量之結果,一方面應顧及霜害之是否能完全免除,另一方面應顧及當地環境,以求費用之經濟,結果如何全在當事者之填密調查與考慮,防止霜凍之方法,可分爲治標、治本與從權三種,均視土壤類別及當地材料情形而定,茲分述如次。

治本方法 土壤之屬於劇烈霜凍土壤類者,非根本將此類土壤按冰凍深度挖去,而填以非霜凍土壤後不能收效,霜凍深度可在結冰時,作實地探驗,或根據土壤斷面圖推求之,其施工法與公路土方施工法相同,僅將霜凍土壤按規定之深度挖去,即隨時填以非霜凍土壤,夯擊堅實,非霜凍土壤之上,可仍以原有霜凍土壤填滿之,蓋霜凍層僅開始於地面之下若干距離,地面上層因蒸發率較大,不致有霜凍現象發生,故雖填鋪霜凍土壤亦不致爲患,如結冰區域甚大而霜凍深度極深,挖土填土費用至大,且如當地非霜凍土壤產源缺乏,治本方法全不可能時,則惟有採用下述從權方式,美國公路局最近根據各州所用之防止霜凍方法歸納而得數種,其屬於治本者有圖 60

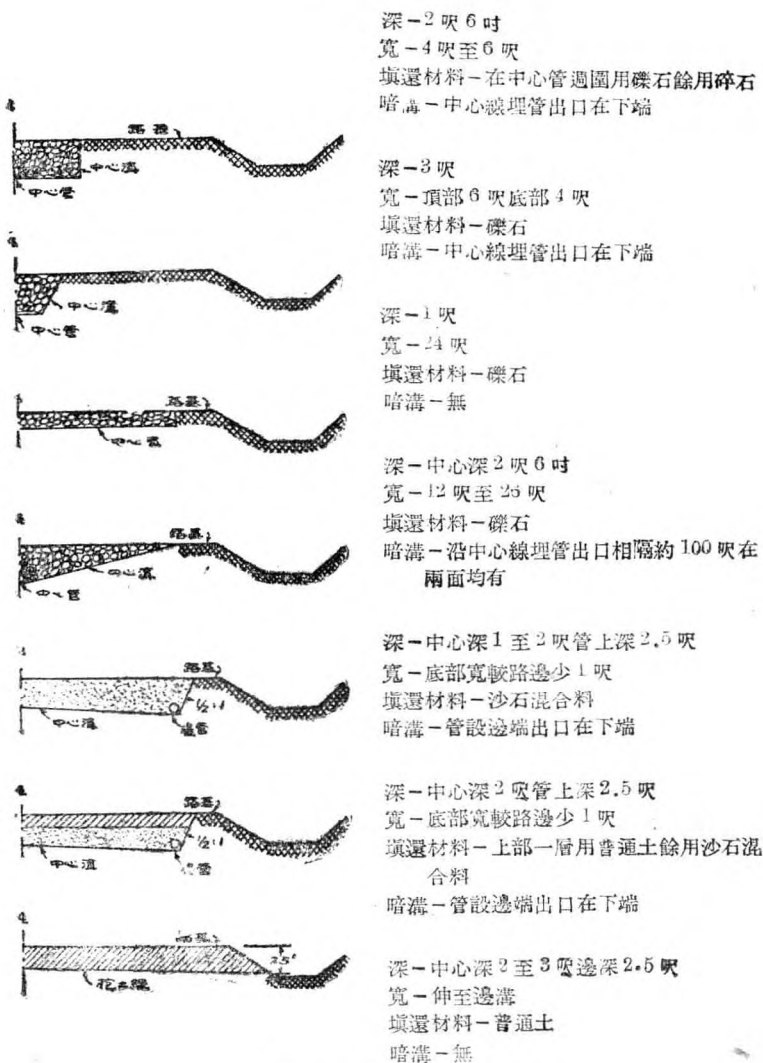


圖 60. 更易土壤防止霜凍法

所示各種，最近瑞士曾採用稻草、石苔及松樹類，在一定溼氣狀況下抵抗腐蝕性強植物，以代替霜凍材料，其結果頗為良好。

治標方法 土壤之屬於輕微霜凍土壤類者，理論辦法，自仍以治本為宜，然往往因非霜凍土壤缺乏，只能採用治標方法。治標方法不外加設排水設備，將地下水用暗溝導出路線以外，或降低地下水位，至適當深度，而避免霜凍之產生，同時如有泉源之處，應設法將泉水來路截斷，路面水分亦設法使之完全排除。如此則土壤含水量可以減至最低限度，霜凍程度不致過劇。惟排水設備之設計，須求審慎，暗溝之長短、大小、位置均應按照實地情形詳細研究，如有過去經驗可以作為參考，尤為妥善。惟排水設備費用並不較治本方法為經濟，故如材料來源不困難時，仍以治本為永久經濟之策。圖 61 所示各種排水設備為美國公路局對於霜凍土壤治標之最常用者。

從權方法 從權方法，可以實用於任何霜害之土壤，其原理即為使土壤霜凍深度一致。前節業已論及，在同一路面下各種土壤之霜凍程度並不一致，結果其膨脹力亦各有大小，而引起路面之片斷破裂。故如有可靠之土壤縱斷面圖，設計工程司根據圖中土壤之分布及深淺，與各種土壤結冰之深度，定一防止霜害設計線。在此線之土壤霜凍程度完全相同，因霜凍而產生之膨脹力亦完全相等，則路面不致有局部之損壞，而結冰融解後，路面能依然恢復其原來位置。設計防止霜凍坡度線時，應考慮之各點與紙上定線(paper location)時相同，惟因事實上之需要，不必顧及填土挖土之平衡，而須以將來霜凍深度，是否能完全一致為目的。

雪之阻止熱傳導力頗大，已如第一節所述，路面如有積雪，可以

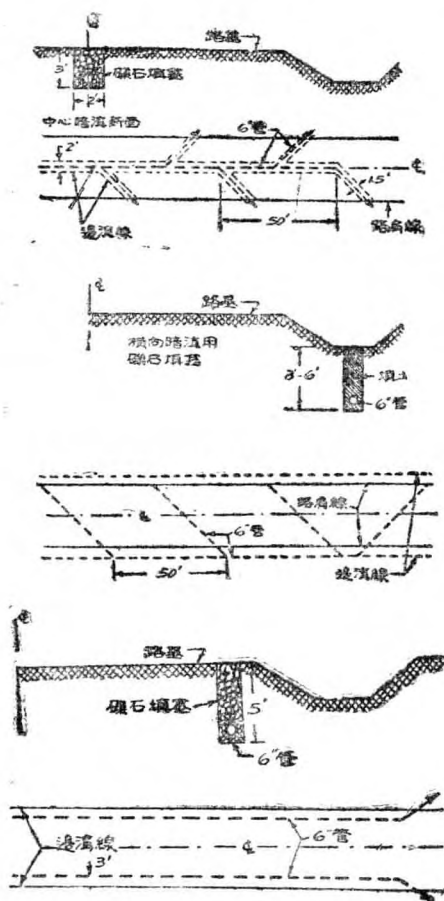


圖 61. 排水設備防止霜凍法

減輕霜凍深度，惟路面積雪過深，有礙行車安全，不能不加以剷除。養路人員所應注意者為雪之剷除，應前後左右均勻一致，不使有局部剷除過多過少之弊，以免引起不平均之霜凍深度，而產生不一致之膨脹力。

霜凍地段如已具有防止設備，則養路工作至微，僅須致力於路面之養護即足；否則，如無防止霜凍設備，則養路工作至為煩難。霜凍輕微情況下，尚可隨時鋪沙，夯擊滾壓，然劇烈霜凍地段，則養路人員束手無策，冬季聽其封閉，俟春融時始能整理通車。

第二篇 土壤穩定

第十章 土壤之穩定

對於任何工程建築，首應注意者，為其穩定問題，惟有穩定之建築始能歷久不壞。土壤之穩定，有關於建築物之安全尤為重大。蓋無論世界上任何建築物，其最後之承載者，必為地面土壤。因土壤不穩定而致橋樑基礎沉陷，堤壩崩潰，路基塌方等極為常見。最近學者更注意及路基土壤穩定與路面之關係，蓋剛性路面所以破壞者十之八九係因路基土壤不穩定。無穩定之路基，雖有極優良之路面亦不免失敗。

在研究土壤穩定問題之前，應先明瞭穩定之意義。在力學上，若施於物體上之力為平衡，同時若微加外力，如振動支承物體，而該物體不致失其平衡，則該物體可稱為穩定或穩定平衡。反之，若稍加外力而能引起該物體相當移動者謂之不穩定平衡。例如以鉛筆一端垂直立於桌面上，則稍加搖動，鉛筆即失其平衡，是由工程上觀點，該鉛筆為不穩定物體。雖然，穩定與否並非絕對名詞，何種狀況下為絕對穩定，何種為絕對不穩定，並無一定之限定。例如，若上述之鉛筆所立之處絕不致有任何外力搖動之，則可稱該鉛筆為穩定；若該鉛筆係立於普通之桌面上，則僅能稱之為不穩定。絕對穩定狀況為將鉛筆之一端懸起，如此，則無論以任何外力加之，該鉛筆終將恢復其原狀。

穩定與形變不可混爲一談，例如，以木板一塊橫置於二支點上，則此板係在平衡穩定狀況，加壓力於板上，僅能使板彎曲發生形變，而不致影響其穩定。立於一端之鉛筆，稍加外力立即失去其平衡，但其本身並無任何形變；而橫置於二支點上之木板，雖加大外力使其本身起重大形變，仍不致失去其平衡。由上觀之，物體之穩定與其形變，係兩種全不相干之現象。故由土壤立點上觀之，建築物之因土壤壓實而漸漸下沉，並非屬於穩定問題，若建築物因下沉而致崩潰，是由於建築物失去平衡，而非土壤之不穩定。在土壤之應力(stress)未超過其抗剪力之前，土壤本身不過起形變而不致於崩潰。設加於土壤上外力之強度超過其極限抗剪強度(ultimate shearing strength)，則土壤開始流動，全部崩潰即接踵而至矣。若剪應力小於極限抗剪強度，或外部之力量不致影響於極限抗剪強度之值，則該土壤可稱爲穩定。至於由外力所生之形變或體質變化，則與土壤之穩定與否不相干。

總以上所述，可知土壤穩定之定義，與普通一般所想像之穩定定義，或力學上之穩定定義俱相同。所謂土壤穩定，即爲一切外力平衡時之現象，外力包括有地心引力，滲漏壓力(seepage pressure)，地震之振動，及一切建築時人爲之擾動。穩定並非指形變而言，而在抗剪壓力是否超過其極限而定。

穩定並非一種純一物理性，如比重、滲透、可壓性或內阻力等。穩定不能在一種樣品上量得，更不能用單一數量表明之，而係由數種物理性及所施之外力情形之總合結果。吾人至今尚不能斷定某種土壤穩定究竟係受何種外力或物理性所形成，蓋外力之大小，其局部情

形,以及其他可能之事實,均非能詳知者,例如無黏性之沙與礫石可形成非常穩定之路基,但若用之為路面,則於載重後立即活動,蓋其抗剪力在此種情形下甚易超過其極限,故必須加以黏土或瀝青以增強其抗剪力,始能用為路面材料。

第一節 穩定原理

土壤因失其穩定而移動之原理,可由圖 62 闡明之。設載重面積之寬為 $2b$,長為無限,當荷重過高時, A 部土壤必沿 S 平面流動如圖

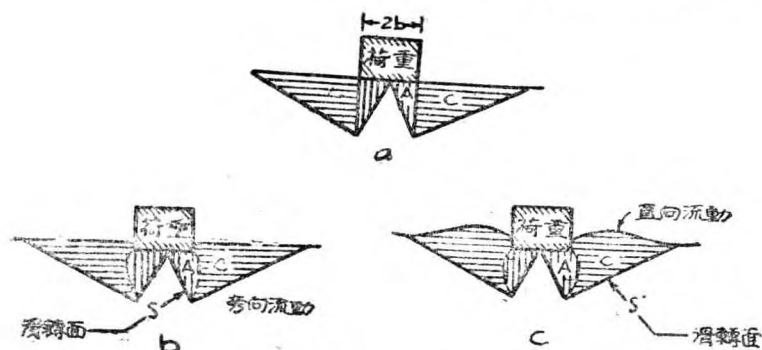


圖 62. 土壤失去穩定之原理

62(b), 因之鄰近之 C 部土壤亦必沿 S' 平面流動, 因之荷重兩旁之土壤, 勢必凸起如圖 62(c), 欲防止此種車轍(rut)現象, C 部土壤必具有強抵抗力阻止 A 部土壤之上昇。欲達此目的, 有兩種方法, 或兼用二法, 第一法須使 S 與 S' 平面之抗剪力加高, 防止土壤滑動, 第二法則為增加路面之重量, 以壓服 C 部土壤, 防止其上昇。

上述第一法使 S 與 S' 平面上抗剪力增加, 防止土壤滑動, 欲達

此目的，必須增加土壤之內阻力與其黏力，此二力為形成土壤穩定之主要因素，土壤必須兼具此二力，始能達到穩定狀況，僅有內阻力或僅有黏力，均不能謂穩定之土壤也。內阻力之影響於土壤平面抗翦力，可由圖 63 表之。

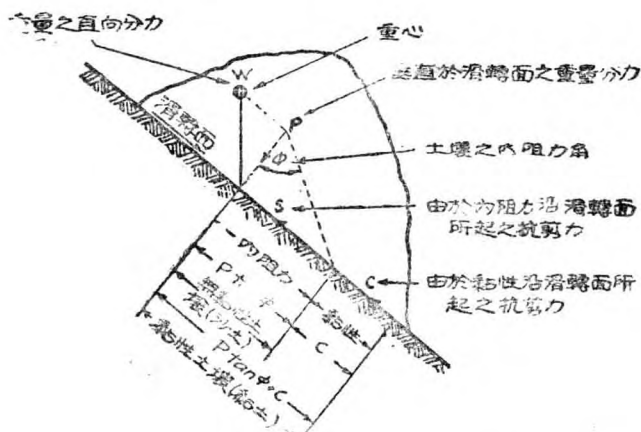


圖 63. 土壤內阻力、黏力與抗翦力之關係

設 W 為在斜坡上之土塊， S 為沿斜面所生之抗翦力，此抗翦力與土塊重量 W 成平衡，使之不得滑動，抗翦力可分為二部，曰：內阻力與黏力。

(一)內阻力 每單位面積內阻力 = $P \tan \phi$ 。

其中 $P = W$ 之分力垂直於滑動面上，以每平方呎之噸數或每平方公尺之公斤數計算之，

ϕ = 內阻力角之角度，即其正切為 S/P 。（ $\tan \phi$ 為內阻力角係數）。

黏力所發生之影響用 C 表之，當內阻力為零時，則全部抗剪力受 C 之影響，其單位抗剪阻力則為

$$S = P \tan \phi + C.$$

如土壤富於黏性且 ϕ 角甚小，則 S 之值甚近於 C ，但普通土壤鮮有見 ϕ 之值等於零者。

無黏性之土壤，其穩定性完全在其內阻力，內阻力則因土壤重量與土壤粗糙度而定。其原理可用下例說明之：

設有一 1 立方呎石塊，立於一鐵板上。若板面係在水平，則石塊

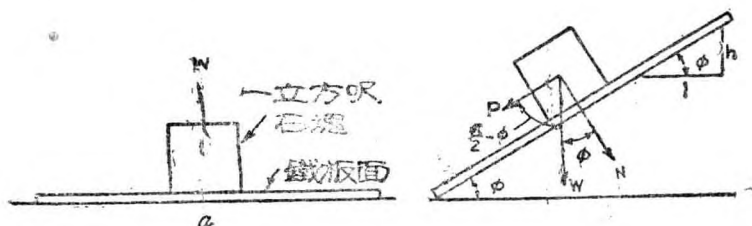


圖 64.

之重心垂直於鐵板上，而不致引起滑動作用，如圖 64(a)；若將鐵板面傾斜，使其斜度為 ϕ 如 64(b)，則石塊之重力分為兩部：一部 N 力垂直於鐵板面，其作用在阻止石塊下滑，另一部 P 力平衡於鐵板面，其作用在使推進石塊下滑。用公式表之，則

$$N = W \cos \phi = \frac{1}{\sqrt{1+h^2}} W;$$

$$P = W \sin \phi = \frac{h}{\sqrt{1+h^2}} W.$$

設 f = 摩擦係數,

則 $Wf = S$;

$$Nf = Wf \frac{1}{\sqrt{1+h^2}}.$$

增加 h 之值則增加 P 之力, 減少 N 力, 至 P 等於 S 時石塊開始下滑。此時 h 之值即等於摩擦係數 f 。實驗結果為 ϕ 為 17° ($h = 0.30$) 時石塊開始滑動, 石塊重量為 168.5 磅,

$$S = 0.30 \times 168.5 = 49.95.$$

減少石塊之重量, 則 S 之值亦減少; 反之, 增加 W 之值, 則 S 之值亦增。

如前例之石塊重量不變而將鐵板之面磨粗, 則石塊開始滑轉時, h 之值等於 0.70 ($\phi = 35^\circ$), $S = 118$ 磅。反之, 若將鐵板面加油, 使之滑潤, 則 h 之值減至 0.10 ($\phi = 6^\circ$), $S = 17$ 磅。

總之, 內阻力之作用有如磨擦兩片沙布, 壓力大, 則摩擦力亦大, 沙布愈粗糙, 則摩擦力亦愈大。在土壤上壓力即土壤本身之重量, 如土壤本身無重量, 則亦不能發生內阻力作用。故沙土之穩定性, 因土壤之重量而增加, 至於磨擦面之粗糙情形則不變。例如, 海濱之沙灘, 當潮水退時, 極為穩定, 可利用為汽車競賽場。若沙灘被潮水淹沒, 則沙土之穩定性減少, 蓋其有效比重減少約 40% (由 2.65 減至 1.65); 換言之, 即其重量減輕, 內阻力減少。若沙灘下發現泉眼, 水由下而上, 則其穩定性將全失, 沙土變成流沙 (quicksand)。蓋在此種情形之下, 沙土之有效重量更減少, 內阻力減至極小程度, 土壤之穩定性亦全失。

(二)黏力 設前圖 64 之石塊在 $h=0.30$ 吋時開始滑動。今若用膠水黏連石塊與鐵板，使之在 $h=1.42$ 吋之前，不得滑動，則膠水之黏力可由下式計之。全部引起滑動之力

$$P = 168.5 \times \frac{1.42}{\sqrt{1+1.42^2}} = 137.7 \text{ 磅。}$$

全部抵抗滑轉之摩擦力為：

$$N = 168.5 \times \frac{1}{\sqrt{1+1.42^2}} = 29.1 \text{ 磅。}$$

兩力之差為 $137.7 - 29.1 = 108.6$ 磅/平方公尺，亦即土壤之黏力。

土壤中之黏力，有種種不同狀態。在混凝土中，其化學結晶供給主要之黏力；在地瀝青混合料中，柏油或瀝青膠結供給主要之黏力；在泥結碎石路 (claybound macadam) 主要黏力為黏土，水結碎石路 (water-bound macadam) 主要黏力為石粉；在海濱沙土，其主要黏力則為溼氣膜。

第二節 土壤之承载力

穩定土壤之承载力 (supporting value)，較不穩定之土壤為大。

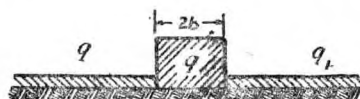


圖 65.

太沙基氏於 1929 年用數學方式，算得土壤承载力種種不同之值。在

計算中假定荷重面積 (loaded area) 之長度遠大於其寬度。此種假定並不符合實際車輛載重情形，但為計算簡單起見，不得不用此項假設。

如圖 65, 設

q = 單位面積荷重,

q_1 = 荷重鄰地載重之單位面積荷重,

$2b$ = 荷重面積之寬,

s = 土壤每單位體積之重量,

C = 黏力 (單位面積上之力),

ϕ = 內阻力角,

$$\beta = 45^\circ - \frac{\phi}{2}.$$

即為土壤之承载力, 其值因黏力、內阻力、荷重面積及鄰地載重 (surcharge) 而變, 可用下式表之。公式之由來, 可參閱“Public Road”, 第十卷, 第三期。

$$q = \frac{bs(1 - \tan^2\beta)}{(2\tan^2\beta)} + \frac{q_1}{\tan^2\beta} + \frac{2C}{\tan\beta\sin^2\beta}.$$

公式中第一項表示內阻力, 第二項表示鄰地載重之影響, 第三項表示黏力。將種種普通路面情形代入式中, 即可得下表 21。

由表觀之, 設將 ϕ 之值由 10° (粉沙之內阻力角) 增至 34° (沙土之內阻力角), 則土壤之穩定數由每平方呎 15 磅增至每平方呎 270 磅。設將乾沙土浸於水中, 則其每立方呎之有效重量由 100 磅減至 63 磅, 同時, 其穩定數由 270 磅減至 170 磅。

表 21. 內阻力, 黏力, 荷重面積之寬及荷重鄰地載重與土壤穩定之關係

土壤種類	黏 力 (C) 磅/平方呎	內阻力角 (φ) 度 數	承 載 力 (磅/平方呎)			黏力相消數 (磅/平方呎)	
			$q_1=0$	$q_1=100$	$q_1=0$	$q_1=100$	$b=2.5'$
			$s=100$ $b=0.25'$	$s=1:0$ $b=0.25'$	$s=1:0$ $b=2.5'$		
溼粉沙土	0	10	15	220	150	35	25
乾沙土	0	34	270	1,520	2,710	75	145
浸水沙土 ($s=6'$)	0	34	170	1,420	1,710	75	90
液狀黏土	100	0	400	500	400		
極軟黏土	200	2	830	980	880		
軟黏土	400	4	1,860	1,980	1,890		
半硬黏土	1,000	6	4,970	5,120	5,030		
極硬黏土	2,000	12	12,490	12,720	12,680		
溼沙礫混合物	500	34	8,800	10,060	11,240		
沙礫混合物	1,000	34	17,340	18,590	19,770		

若將無黏性沙土之荷重面積寬度增加10倍,則其穩定數由每平方呎 270 磅增至每平方呎 2,710 磅。若將荷重鄰地加以每平方呎 100 磅之承載(約等於八吋厚路面之重量),則其穩定數由每平方呎 2.0 磅,增至每平方呎 1,520 磅。

減少黏土中之水分,或加以沙土,均可使其穩定數增大。同時,若加黏土於沙土中亦可增其穩定。若該土壤之黏力為每平方呎 1,000 磅 $b=0.25$ 呎 $q_1=0$,若 $\phi=6^\circ$,則其承載力為每平方呎 4,970 磅;若 $\phi=34^\circ$,則承載力增至 17,340 磅,若 ϕ 之值不變,而 C 之值由每平方呎

零磅增至 500 磅,再增至 1,000 磅,則承載力亦將由每平方呎 270 磅增至 8,800 磅,再增至 17,340 磅。

設上述之粉沙土, $\phi = 10^\circ$, $C = 0$, 其承載力為每平方呎 15 磅, 今若使 C 之值增至 431 磅, 則其承載力將增至 2,500 磅。又在前述之乾沙土中, $\phi = 34^\circ$, $C = 0$, 其承載力為每平方呎 270 磅, 今若使 C 之值增至 270 磅, 則其承載力將增至 2,500 磅。圖 66 表示荷重面積與承載力之關係, 圖 67 表示增加荷重鄰地載重與承載力之關係。

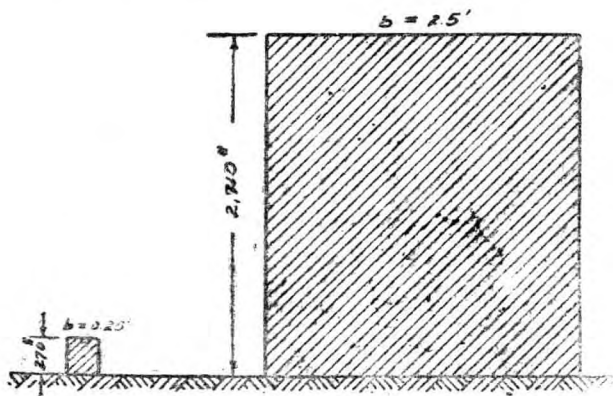


圖 63.(A) 無黏性乾沙土

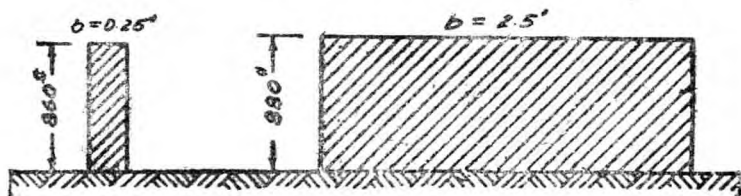


圖 66.(B) 極軟沙土

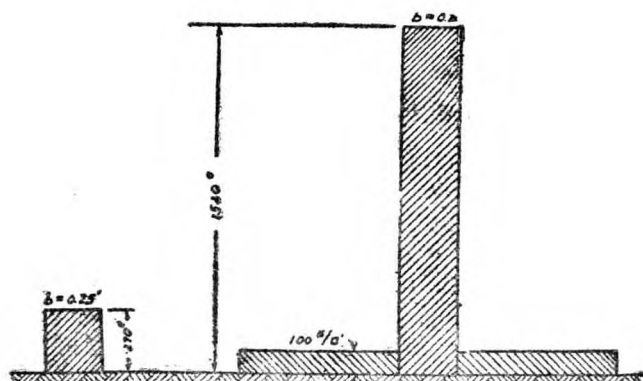


圖 67.(A) 無黏性乾沙土

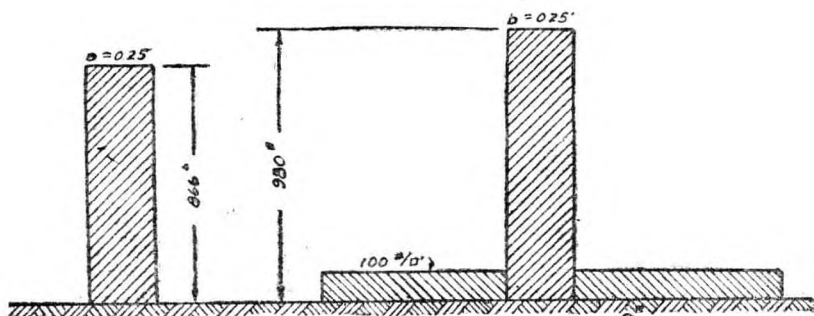


圖 7.(B) 極軟黏土

總觀以上實驗事實，可知土壤之穩定不但由於土壤之內阻力與黏力，而與荷重面積之寬度等亦有莫大之關係，茲總述之如下：

(1) 於無黏性沙土上，若增加荷重面積之寬度，並加載重於荷重鄰地，則土壤之單位承載力將大增。此種現象只限於內阻力甚大而黏性極微之土壤。按太沙基氏實驗結果，若荷重面積係扁長形，其結

果較方形或圓形更為顯著。

(2)於黏力甚大之土壤，增加荷重面積之寬度，並加載重於荷重鄰地，則土壤之單位承载力並無任何顯著之增加，此種現象，只限於內阻力甚小而黏性甚大之土壤。

第十一章 壓實法穩定土壤

壓實土壤使之穩定有兩種方法，曰壓實 (compaction) 與凝實 (densification)。用何種方法壓實土壤，應視土壤之特性、混合料之情狀及建築之目的而定。

當車輛經過鬆沙或軟泥路基時，車輛均有下陷之勢。粒狀之沙土則因下陷而壓實，黏土則因旁面流動而生車轍，但不能使之壓實。故凡具有大量之粒狀材料，如級配沙石路面，當車輛經過其上時，壓力立即傳布於路面之全部，使之漸趨壓實。壓實此種土壤時其應用水分若干，每層厚度若干，以及壓實後之密度如何，均無規定。上述之情形謂之壓實。

反之，若土壤中粗料較少黏性細料較多，則壓力加於其上時僅能影響及接近壓力之土壤。而下部之土壤則不受其影響。故用普通路轆壓實此種土壤，每致發生層次而不能生效。故應分層用羊蹄轆 (sheepfoot roller) 碾之，使均勻壓實不致有層次之發生。羊蹄轆之單位壓力最高可達到每平方呎 140 磅，壓實時係用一定之水分、一定之壓實厚度，故其壓實後之密度亦可豫知。此種壓實法稱為凝實土壤。

由上可知，用凝實法可增加土壤之穩定。1933年美國加州水利

局普拉脫(R. R. Proctor)氏首對於此問題加以研究，普氏將其研究結果應用於土壤之建築得極大之效果。翌年美國公路局以此法即能應用於土壤，亦可用於壓實黏性土壤路基，試驗結果，成效甚著。今則普氏壓實法已為壓實公路路基標準辦法矣。

第一節 壓實土壤原理

土壤之含水成分能影響其壓實度，為壓實土壤最重要之原理。在低含水時壓實土壤，其結果可成表面堅固不易流動之狀況，遇水則極易失去穩定。若用稍高水分，用同法壓實之，則土壤質點分布大不相同，其結果可得密度較大、空隙較少、較易流動之狀況。更加水則可得密度更大之壓實土壤，至水分達到某成分時土壤中之空隙完全被水分及空氣所充滿，此時土壤之密度最大，其空隙亦最少。若更加水則水分所占之地位超過土壤之空隙，結果其密度自然減少，此種現象繼續進行，直至水分過多時土壤成極易流動狀態，黏着於路轆或羊蹄輾之齒上，無法更行壓實矣。

由上可知，在一定水分時，用一定壓實法土壤中之空隙可減少至最低限度，其密度亦可達到最高點；在此種狀況下，外部水分最難透入，即使侵入，因土壤質點甚為接近，亦難起滑轉作用。此一定之水分，普拉脫氏稱之為“最佳含水量”(optimum moisture content)。

圖 68 為某種黏土之壓實重量更變表，用同一壓實法，與不同之含水量，可得不同之重量。圖之橫座標表示含水量，縱座標表示土壤之每立方呎之重量。曲線(b)為乾重曲線，乾重曲線上之值係得自曲線(a)之值減去含水量之重量。

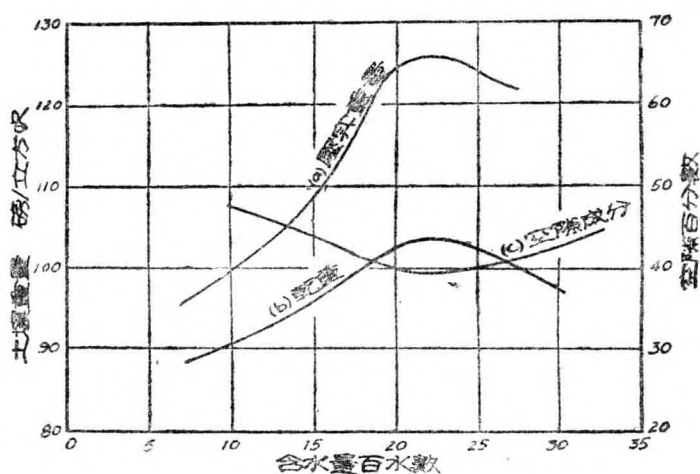


圖 68. 壓實重量與含水量之關係

設 m = 水分重量,
 W = 乾土重量(磅/立方呎),
 W' = 乾土與水重量(磅/立方呎),
 P = 水分之百分數,

則

$$W = W' - m,$$

$$m = P(W' - m),$$

$$W = W' - \frac{PW'}{1+P} = \frac{W'}{1+P}.$$

曲線(c)為空隙之百分數曲線,係得自土壤乾重及其比重.

設 g = 土壤之比重,
 V = 土壤之百分數,

則

$$P = \frac{64.4g - W}{64.4g} \times 100.$$

普通僅用曲線(b)代表壓實土壤之性質，曲線(a)與(c)不過用以表示其與曲線(b)之關係。圖中水分在28%與17%時土壤之每立方呎乾重相同，但此二者之塑性大不相同，前者土質幾為液狀而後者則甚硬，若用鉛筆試之立知其塑性之不同。在最佳含水量時土壤之塑性雖不高，但能保持其塑性不致因外部水分侵入而減少，蓋在最

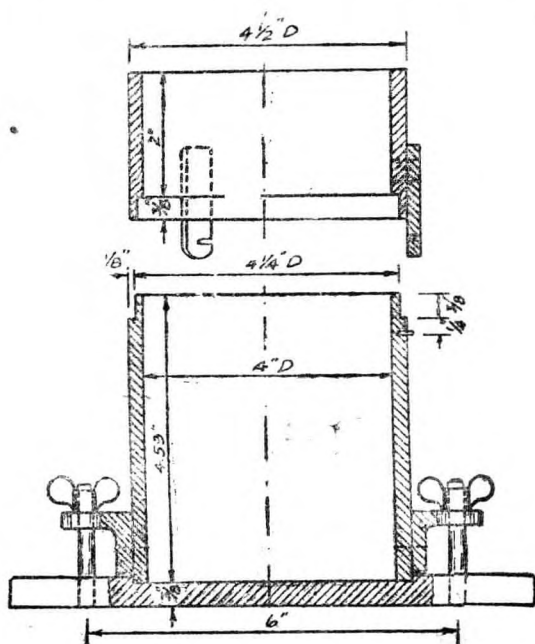
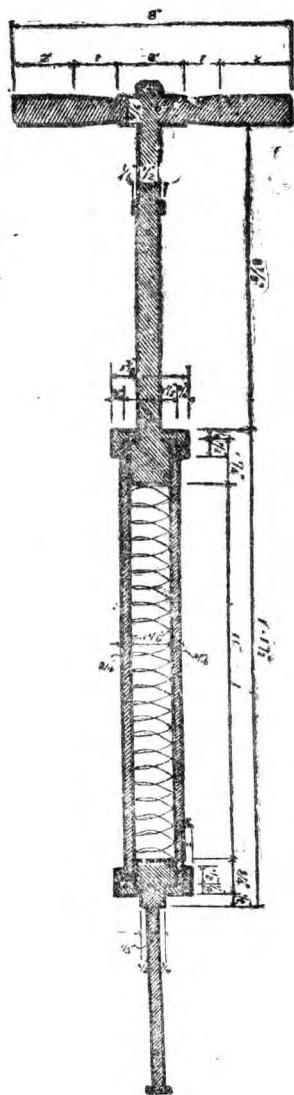


圖89. 壓實試驗儀

佳含水量時水之質點與土壤之質點之吸附引力(adsorptive attrac-



tion) 已完全滿足, 故能抵抗外部水分之侵入。

第二節 最佳含水量之測定

普拉脫氏測定土壤最佳含水量之主要儀器, 爲一銅製圓筒如圖 69, 筒之內徑爲 4 吋, 高 4 1/2 吋, 筒之底端附有可移動之底板, 他端套有 2 吋高之圓筒, 以便壓實筒內土壤, 壓實土壤時係用 5 磅之錘, 錘之底面面積爲 3 平方吋。此外應具有塑性針(plasticity needle), 針端面面積應先量得, 塑性針之構造如圖 70。

測驗時, 用約 5 磅重通過 # 10 篩之土壤, 用少量清水潤和之使之略潮, 然後置於圓筒中分三層壓實之; 每次用錘夯擊 25 次, 夯時應使錘由距土面一呎處落下。三次壓實筒中土壤後, 除去筒口剩餘之土壤, 然後視其重量, 是爲土壤之壓實重(土壤與水分之合重)。用塑性針插入土中, 測其貫入所需之

力，貫入速度應為每秒半吋，並應垂直於土面，始能得正確結果。由筒中取出少許土壤，置於烘乾爐中，測其含水量。

重複以上試驗，每次加水約 1%，至土壤漸成極溼狀態，同時壓實重量漸次減少為止。試驗結果可用圖解表出，如圖 71。縱座標表示土壤之密度，橫座標表示含水量，塑性針之讀數，亦於同圖中表出。此曲線表示含水量與穩定之關係。

如圖可知土壤之最佳含水量為 25%，若用該含水量以壓實土壤，可得最高之密度，同時在此含水量時之穩定度為每平方吋 1,200 磅。此穩定度並非最高，但較 1,200 更高之穩定度不過暫時現象，若壓實後遇水，則立時減少。例

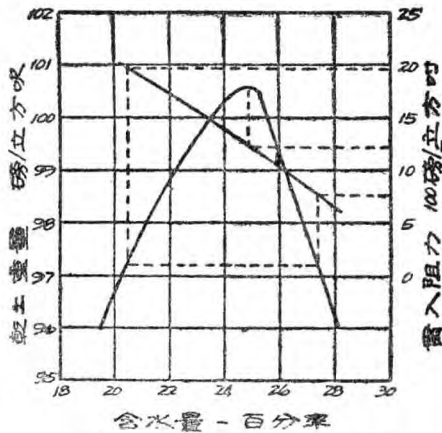


圖 71. 土壤含水量與重量之關係

圖中當含水量為 20% 時，其穩定度為每平方吋 1,950 磅，但其乾重每立方呎僅 97 磅，遇水後含水量立時增加至約 27%，此時其穩定度則每平方呎僅 750 磅矣。

以上所述土壤含水量均相當於土壤之乾重。今若以土壤與其含水量之體積表示之，則連接各點可得一直線關係如圖 72。

設 W' = 含水量百分數，以土壤體積與其含水體積表之；

W = 含水量百分數，以土壤重量表之。

則

$$W' = \frac{W}{W + \frac{100}{g}} \times 100.$$

由圖可知，土壤顯然經過四種不同過程(由四條直線表示)，含水增至

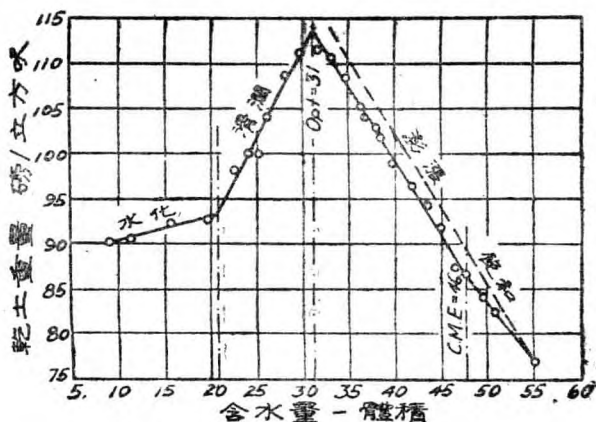


圖 72. 土壤含水量體積與重量之關係

20.7% 時謂之水化過程；在此過程中，一部分水分被土壤質點所吸收，一部分被其表面所吸附，成爲一種黏性薄膜 (cohesive film)。在此過程中，土壤最高含水量謂之“水化限度”(hydration limit)。

含水在 20.7% 至 31.0% 間爲滑潤 (lubrication) 過程。此時一部分土壤含水有滑潤效用，使土壤之顆粒重新排列，達到密結狀態，同時排去一部空隙中空氣。在此過程中，土壤最高含水量謂之“滑潤限度”，亦即土壤最佳含水量。

含水 31.0% 至 47.7% 間爲膨脹 (swell) 過程。含水超過 31.0% 使土壤膨脹，在膨脹限度時土壤中大部空氣已被排出。

含水在 47.7% 至 55.0% 間為飽和 (saturation) 過程。在土壤達到飽和限度時，土壤中全部空氣幾乎完全排出，而土壤達到飽和狀態。

第三節 溼氣膜厚度與壓實土壤之關係

土壤所含之水分可分為二部，游離水及吸附水 (absorbed water)。游離水存於土壤外部，與普通水無異；吸附水則包圍於土壤質點之四周，其性質與普通水不同，其沸點較普通為高，冰點較低，表面張力較大，黏度亦較大。吸附水接近於土壤表面之部分具有固體性，又稱為固體化水 (solidified water)，靠外之部則近似游離水，又稱為黏水 (cohesive water)。吸附水又稱為溼氣膜，其厚度有關於土壤之性質至大。溼氣膜厚度之計算法可用下例闡明之。

設用圖 72 之土壤，其中含沙 44%，含粉沙 12%，含黏土 11%，含膠體 33%。該土壤在水化限度時之溼氣膜厚度計算如表 22。

表 22.

土 壤	平均直徑 (d)	比 面 ($6/d$)	表面面積	土 壤 級 配		表面面積
				重		
	cm.	cm. ² /cm.	ft. ² /lb.	%	lb./ft. ³	ft. ² /ft. ³
沙 土	0.0525	113	20.4	44	41.2	840
粉 沙	0.00275	2,18.	390	12	11.2	4,380
黏 土	0.003	20,000	3,600	11	10.3	37,100
膠 體	0.00005	120,000	21,600	33	30.8	665,000
				總 計	91.5	707,320

乾 重 = 93.5 磅/立方呎(在水化限度時, 圖 72),

土壤比重 = 2.72,

453.6 g. = lb.,

929 cm.² = 1 sq. ft.

$$\frac{\text{cm.}^3}{\text{cm.}^3} \times \frac{1}{2.72} = \frac{\text{cm.}^3}{\text{g.}},$$

$$\frac{\text{cm.}^3}{\text{g.}} \times \frac{453.6}{929.0} = \frac{\text{ft.}^3}{\text{lb.}},$$

$$\frac{\text{cm.}^3}{\text{c.n.}^3} \times \frac{453.6}{2.72 \times 929.0} = \frac{\text{cm.}^3}{\text{cm.}^3} \times 0.18 = \frac{\text{ft.}^3}{\text{lb.}}$$

$$\text{溼氣膜厚度} = \frac{0.207}{707,320} = 0.000,000,293 \text{ 呎}$$

$$= 0.000,000,293 \times 12 = \frac{3.5}{1,000,000} \text{ 吋}$$

$$= 0.000,0035 \times 25.4 = 0.000,088 \text{ 公厘}$$

(0.088 渺公尺 micron).

[註] 表面面積 (surface area) 亦即比面 (specific surface), 為每單位體積之表面面積。用質點之體積除其表面面積, 即可得質點之比面。例如

$$\text{球之比面} = \frac{4\pi r^2}{\frac{4}{3}\pi r^3} = \frac{3}{r} = \frac{6}{d}.$$

用同法求得土壤在滑潤限度時, 溼氣膜厚度為 $\frac{5}{1,000,000}$ 吋; 在膨

脹限度時為 $\frac{9}{1,000,000}$ 吋; 在飽和限度時為 $\frac{11}{1,000,000}$ 吋。

溼氣膜厚度相差百萬分之幾，對於沙或礫石之質點固無關重要，而對於質點徑小在 $1/10,000$ 吋之黏土則有極大關係，並能控制大部土壤之行爲。

如圖 73，在水化過程中，溼氣膜之黏度較游離水爲大，具有膠合性。至水化限度，膜厚已增至 $3.5/1,000,000$ 吋。在滑潤過程中，膜厚更增至 $5/1,000,000$ 吋，較水化過程增多 $1.5/1,000,000$ 吋。此部之增出溼氣膜性質類似游離水，能使質點易於承受壓實作用，此時土壤中之空氣亦減少約 1.5%。

在膨脹過程中，溼氣膜厚度增至 $9/1,000,000$ 吋，此時空隙中空氣體積則無甚變化，在此種厚度時之溼氣膜不受地心重力之影響，而吸附於質點表面。含水超過膨脹限度後，則溼氣膜受地心重力之影響，超過其吸附於質點上之力，因之水分漸漸占據空隙中空氣之地位。至溼氣膜厚度到達 $11/1,000,000$ 吋，土壤完全達到飽和狀態。附着於質點上之溼氣膜，其附着力極強，雖在 1,000 倍於地

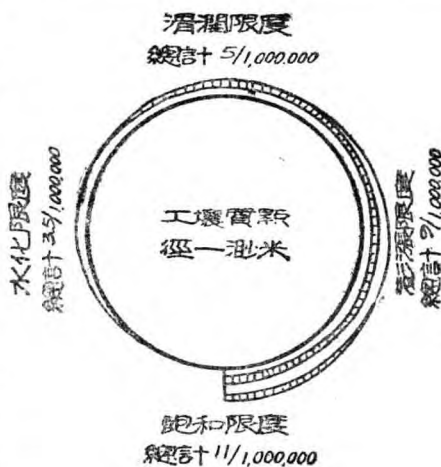


圖 73. 吸附溼氣膜

心吸力之離心力下，仍不能使之分開。在離心含水當量時，上述土壤之溼氣膜厚度約爲 $10/1,000,000$ 。

根據動能理論(kinetic theory),溫度變化直接影響及土壤與水之關係,使水分子之動能與固體表面之能失去其平衡狀態,故溫度降低,可使溼氣膜厚度增加;同時溫度減低,可使溼氣膜突由固體化水或黏性狀態變為游離水,因之使土壤入過飽和狀態(supersaturation),黏性與穩定性頓減,有時使建築物發生嚴重危險。

圖 74 表示兩種土壤在同樣壓實情形下,溫度與含水量之關係。

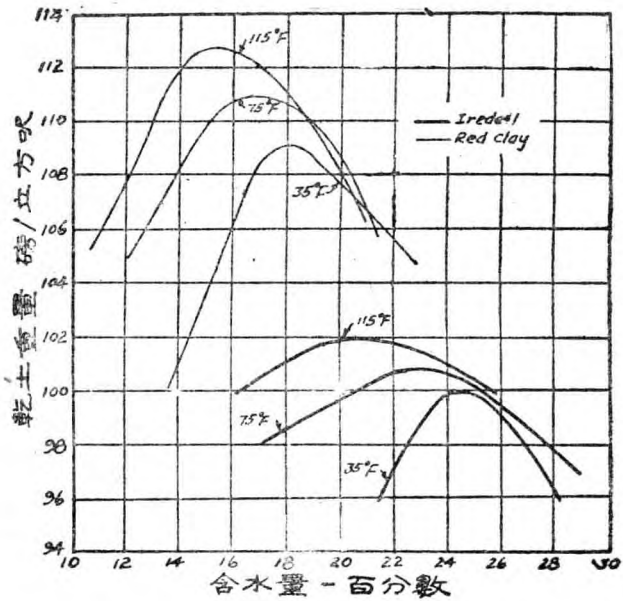


圖 74. 溫度與含水量之關係

曲線表示溫度增高,則最佳含水量減少而密度增高。

圖 75 表示溫度與穩定度之關係,係具有可逆性(reversible),用紅黏土作實驗在 42° F 時壓實之,其穩定度每平方呎 1,400 磅。若將

土壤之溫度增至 130°F ，則其穩定度減至每平方呎 960 磅；更將溫度

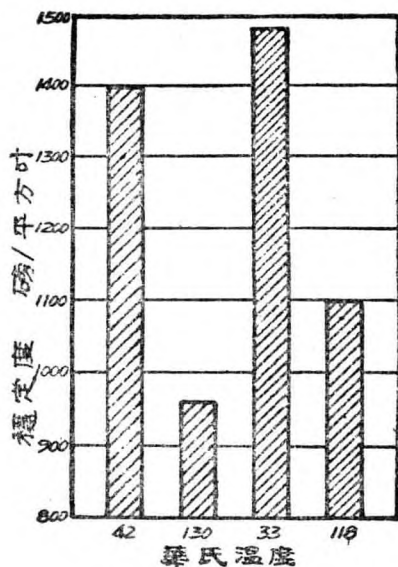


圖 75. 溫度與穩定度之關係

減至 33°F ，其穩定度更增至 1,480 磅；最後更將溫度增至 118°F ，其穩定又降至 1,100 磅。

第十二章 級配沙石路面

溯自百年前碎石式 (macadam) 路面發明以來，低價路面之建築迄今無甚改進；至最近十年來，美國鑑於低價路面之重要，悉心研究，始發明“級配沙石路面” (stabilized soil road)，各州競先採用，碎石路之建築，不更為工程師所注意矣。下節詳述級配沙石路面

之原理、備料、試驗及鋪築方法。

第一節 級配沙石路面之原理

級配沙石路面，必須具有種種不同成分；純一質點之土壤，斷難達到穩定狀況。土木工程司均知，欲得堅固之混凝土，必須有適當數量之石子、沙子、水泥及水分混合而成。此四種原料之成分，均須加以精密之計算，始能得最堅固、最經濟之混凝土。級配沙石路面之原理亦如是，混合料中所含之沙土、粉沙、黏土與水分之數量，均應加以研究，始能得最優良之結果。良好之級配沙石路面，在乾燥時甚為堅硬，車輛駛過，並無顯著之轍跡，或其他磨蝕狀態。其路拱應保持應有之拱度，使雨水能排洩無阻，路面上雖有一薄層鬆動沙料，其量仍應不妨礙車輛之進行。在大雨後或梅雨時節，路面不但不致軟化，且不應有多量之泥濘，更不可有滑脫之現象，使車輛速度不致因而減少。

級配沙石路面完全利用土壤性質，故在路面材料設計時，應注意幾點：（一）級配沙石路應含各級土壤，由粗料、粗砂、細砂、粉沙而至黏土，因其密度最大，一方面既可增強土壤穩定，又可排洩大部分路面水，而不致侵入路內。（二）粗料品質應優良，以抵抗車輛之磨蝕，其尺寸不應過大，以免在粗料間細料被車輛磨蝕。（三）粗沙、細沙足以填滿粗料間空隙，使粗料間無法移動而增加其剪割力。（四）細沙、粉沙之量，足以在乾燥天氣，由毛細作用，供給黏土所需要維持土壤穩定之附着水。（五）黏土不能過多，僅能保持充分附着水，以維持粒子間黏結，但亦不能過少，因與土壤黏結力及密度有關。（六）因溼度變化

影響土壤穩定，應注意土壤液性限度及塑性指數，而限制黏土成分。

最佳之級配沙石路面，應具有下列五種現象：

(一)路面應有相當之穩固與密度，以抵抗車輛之壓力與衝擊。
(二)當路面潮溼時，土壤之黏力大減，此時土壤中粗料與粗沙之內部結合力，應足以使土壤不失其穩定。內部結合力，係質點之連結力，與毛細管含收力合組而成。(三)當路面乾燥時，土壤之黏力應足使沙土與粉沙嚴密膠合，使路面不致鬆動。(四)路面土壤之體積不應有大變化，即黏土膨脹時，不致移動粗料之原有地位。(五)毛細管流動應無阻礙，水分蒸發亦應迅速，務使水分不致停滯於路面上或路床下，蓋雖有良好之路拱，有時仍不免有雨水存積。

第二節 理想級配

研究土壤理想級配之原理者甚多，其中最合實際者為富勒氏 (Fuller's)理想曲線及魏爾摩氏顆粒相礙理論 (Weymouth's theory of particle interference)。兩學說所得之結果與實驗結果均極為相近，其所成之曲線亦幾完全符合，茲分述如次。

富勒氏理想級配：富勒氏理想級配係根據實驗結果而來，由累次實驗所得，富氏發現最大密度之土壤，其級配近似拋物線 (parabolic curve)。曲線之縱座標以土壤逐次減小之百分數表之，橫座標以土壤之質點量表之。

魏爾摩氏顆粒相礙理論：魏氏稱在級配混合物中，某種尺寸之顆粒數目應有規定，使其顆粒間之距離足以容納較小尺寸之顆粒。故若規定各種尺寸顆粒之數目，然後均勻混合之，則可使混合物達

到最高密度。根據此理論，可用數字表示之如下：

設圖 76 為定體積容器，其中盛滿圓球，球之直徑為 D ，球與球

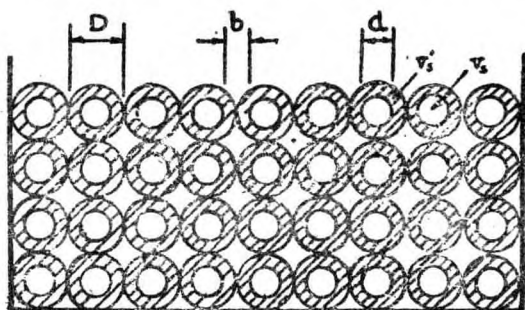


圖 76.

之中心距離亦為 D 。器中所盛之球之絕對體積亦即每單位中之實際體積，為：

$$V_s' = NCD^3.$$

式中 V_s' = 每單位體積中實際體積 (solid volume),

N = 圓球數目,

C = 比例係數 (球體為 $\frac{\pi}{6}$).

今若不變器中圓球之數目而易以較小直徑之圓球 d ，則球與球間之淨距離為 b 。則每單位中實際體積為

$$V_s = Ncd^3.$$

兩次體積之比即為單位體積所失去之密度，亦即所增加之空隙：

$$\frac{V_s'}{V_s} = \frac{NCD^3}{Ncd^3} = \frac{D^3}{d^3},$$

$$\begin{aligned} \frac{D}{d} &= \left(\frac{V_{S'}}{V_S} \right)^{\frac{1}{3}}, \\ \frac{D-d}{d} &= \left(\frac{V_{S'}}{V_S} \right)^{\frac{1}{3}} - 1, \\ b &= D - d, \\ b &= \left[\left(\frac{V_{S'}}{V_S} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] d. \end{aligned} \quad (1)$$

設計級配時務使每種尺寸之顆粒均隔有相當距離，較小尺寸之顆粒嵌於空隙中，亦即使所有尺寸之顆粒均處於最適當之位置。欲達到此目的，必須使填縫之顆粒直徑適等於空隙之直徑。用普通標準篩可分出土壤各種直徑，例如泰勒 (Tyler) 氏篩之直徑係按 $\frac{1}{2}$ 比例減小，式(1)中 d 為第一組土壤直徑， b 為次組土壤之直徑。

$$\frac{b}{d} = \left(\frac{V_{S'}}{V_S} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 = \frac{1}{2} \quad (\text{按泰勒氏篩}).$$

$$\frac{V_{S'}}{V_S} = \left(\frac{3}{2} \right)^3 = 3.33$$

$$V_S = 0.296 V_{S'}.$$

上列結果表示如用泰勒氏篩分析顆粒，則最適當之分配法在使此組顆粒占據其所可能占據地位之 29.6%。上述之計算均係論占據地位與可能占據地位之比例，故比例係數 C 恆被消除；若欲知實際上同尺寸顆粒在單位體積所占之地位，則必須藉實驗測定。在設計土壤理想級配時，所有計算均係比例，故不必顧及 C 之值也。表 23 表示某種理想級配之算法。土壤最大顆粒為 2 mm，此後按泰勒氏篩每級

減少 $\frac{1}{2}$ 。

表 22.

尺 寸 (mm.)	平均直徑 (mm.)	單位體積中地位		累 積 百 分 數	
		可能占據	實際占據	留 於 通 過	
		V	.293V		
2.0 — 1.0	1.5	1	0.293	29.6	70.4
1.0 — 0.5	0.75	0.704	0.209	50.5	49.5
0.5 — 0.25	0.375	0.495	0.147	65.2	34.8
0.25 — 0.125	0.188	0.348	0.103	75.4	24.5
0.125 — 0.0625	0.094	0.245	0.072	82.7	17.3
0.0625 — 0.0313	0.047	0.173	0.051	87.8	12.2
0.0313 — 0.0157	0.0234	0.122	0.035	91.4	8.5
0.0157 — 0.0079	0.0117	0.083	0.025	93.9	6.1
0.0079 — 0.0040	0.0059	0.061	0.018	95.7	4.3
0.0040 — 0.0020	0.0030	0.043	0.013	97.0	3.0
0.0020 — 0.0010	0.0015	0.030	0.009	97.9	2.1
0.0010 — 0.0005	0.0008	0.021	0.006	98.5	1.5
0.0005 — 0.00025	0.0004	0.015	0.004	98.9	1.1
0.00025 — 0.00013	0.0002	0.011	0.003	99.2	0.8
0.00013 — 0.00007	0.0001	0.008	0.003	99.4	0.6

表中第一行表示一組土壤之最大及最小直徑；第二行表示其平均直徑；第三行表示每組土壤之可能占據地位；第四行表示其實際占據地位，亦即等於可能占據地位之 0.296 倍。第二組土壤之可能占據地位得自第一組土壤實際地位之餘 ($1 - 0.296 = 0.704$)；如此類推，至可能占據地位近於零時，亦即第五行累積百分數近於 100% 時止。最後一行結果係為機械分析繪製之用。

級配沙石路面之級配即係根據上述原理而來，但實際應用上不必過於精密。圖 77 係用上法繪成，其最大顆粒規定為 1 吋。在工地上土壤級配每不能達到理想，圖中理想級配外之二曲線表示實際應用時應不出曲線之範圍外，亦即應在表 24 範圍之內。

表 24.

通過之篩號	篩孔 (公厘)	百分數
1 吋	25	100
3/4 吋	20	85-100
4 號	5	55-85
10 號	2	40-65
40 號	1/2	25-45
200 號	1/10	10-25

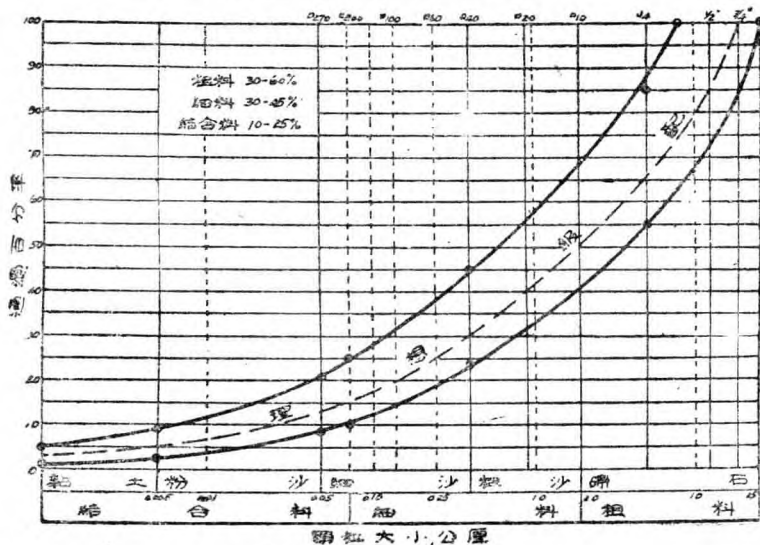


圖 77. 級配沙石級配圖

在特殊情形下，不能有實地試驗(field test)，則混合料之級配是否優良，全賴工程司之實地經驗而斷定。其法取出一部分混合料樣品團於手中，由下列之特性，而鑑別該料之級配是否優良：

- (一)土壤觸手有顆粒之感覺(gritty feeling)；
- (二)土壤團成一定形狀，雖在乾後仍保持其原狀；
- (三)如土壤中黏土附着於手上，僅能將手染有土色；
- (四)若將混合料緊團於手中，成一密實之團，此團當不致易被一鉛筆桿所貫入。

如混合料具有上述種種特性，可證明該土壤已接近穩定之程度。蓋第一條證明混合料有充分顆粒；第二條證明混合料有充分結合料；第三條證明混合料中黏土量並不過多；第四條證明混合料中已有相互鈎連作用。級配沙石路面混合料中細料之塑性指數，可代表該土壤之相對毛細作用及其黏性。在極潮溼地帶，塑性指數應在 3 之下；在普通氣候地帶，應在 3 與 8 之間；在氣候乾燥地帶，應在 9 與 15 之間。塑性指數在 15 以上之混合料，不宜於級配沙石路面之用。

第三節 級配沙石路面材料配合法

樣品試驗 先由有經驗之工程司，視察沿路一帶，認為某地材料可供採用之後，就在其範圍內及週圍，各取出深淺不同之樣品。每一樣品放於蓆或油布上，和勻後堆成圓形，然後分做四分，除去對角兩分，其餘兩分再混合成圓形，依法漸漸減少。最後取對角兩分，大約 2 公斤，記其採取地點及深度，送至試驗室中。用篩分析及機械分

析分別測得土壤之級配，並測量樣品細料之塑性指數，測驗之方法一如第四章所述。

材料配合 由上述試驗，可將材料成分檢出，如天然之土壤已符規定，自屬最佳；惟事實上難得理想材料，必須用幾種不同材料配合而成。由規定級配，知路面材料成分約應為：

粗料	30—30%
細料	30—45%
結合料	10—25%

例如在某處覓得 A 類材料，B 類材料及 C 類材料，依試驗方法，知其成分及性質如表 25：

表 25.

	A 類材料	B 類材料	C 類材料
粗料	92.6	28.7	0.7
細料	6.7	66.8	15.0
結合料	0.7	4.5	84.3
濾過 #40	6.0	62.4	98.5
塑性指數	0	1	30

現欲由 A, B, C 三類材料，配合成 E 材料，其成分如下：

粗料	48%
細料	37%
結合料	15%

用三角形圖解法，極易將 A, B, C 三類材料分量決定。在圖 78 中 $wxyz$ 範圍內，任何一點均適合規定。E 為欲得之混合材料成分。A, B, C 三點，代表 A, B, C 三類材料。連結 AB, BC, CA 三線，由 A 畫一直線，經

E 而相交于 BC 線中 D 點，則 D 材料由 B 及 C 類材料配合而成，其分量依 DB, DC 長短成比例。故

$$\text{混合料 } D, \text{ 爲 } \frac{DC}{BC} (\text{B 類材料}) = \frac{67.5}{88.5} (\text{B 類材料})$$

$$= 76.3\% \text{ B 類材料,}$$

$$\frac{DB}{BC} (\text{C 類材料}) = \frac{21}{88.5} (\text{C 類材料})$$

$$= 23.7\% \text{ C 類材料;}$$

同理， E 混合料，由 A 類材料及 D 混合料配合而成。故

$$\text{混合料 } E, \text{ 爲 } \frac{ED}{AD} (\text{A 類材料}) = \frac{28.5}{78} (\text{A 類材料})$$

$$= 36.5\% \text{ A 類材料,}$$

$$\frac{EA}{AD} (\text{D 混合料}) = \frac{49.5}{78} (\text{D 混合料})$$

$$= 63.5\% \text{ D 混合料.}$$

但 D 混合料爲 76.3% B 類材料及 23.7% C 類材料合成，故 63.5% D 混合料爲：

$$63.5\% \times 76.3\% = 48.5\% \text{ B 類材料,}$$

$$63.5\% \times 23.7\% = 15.0\% \text{ C 類材料.}$$

由此決定 48% 粗料， 37% 細料及 15% 黏料，可用 36.5% A 類材料， 48.5% B 類材料及 15% C 類材料混合而成。此種混合料，其塑性指數 ($P.I.$) 可用下法計算。惟準確之值，仍須實際試驗。

$$\begin{aligned}
 \text{混合料塑性指數} &= \frac{\text{A類}(P.I. \times \text{濾過} \#40 \text{ 之百分率} \times \text{所用百分率})}{\text{A類}(\text{濾過} \#40 \text{ 之百分率} \times \text{所用百分率})} \\
 &+ \frac{\text{B類}(P.I. \times \text{濾過} \#40 \text{ 之百分率} \times \text{所用百分率})}{\text{B類}(\text{濾過} \#40 \text{ 之百分率} \times \text{所用百分率})} \\
 &+ \frac{\text{C類}(P.I. \times \text{濾過} \#40 \text{ 之百分率} \times \text{所用百分率})}{\text{C類}(\text{濾過} \#40 \text{ 之百分率} \times \text{所用百分率})} \\
 &= \frac{0 \times 6 \times 36.5 + 1 \times 62.4 \times 48.5 + 30 \times 98.5 \times 15}{6 \times 36.5 + 62.4 \times 48.5 + 98.5 \times 15} \\
 &= \frac{47,300}{47,14} = 10.
 \end{aligned}$$

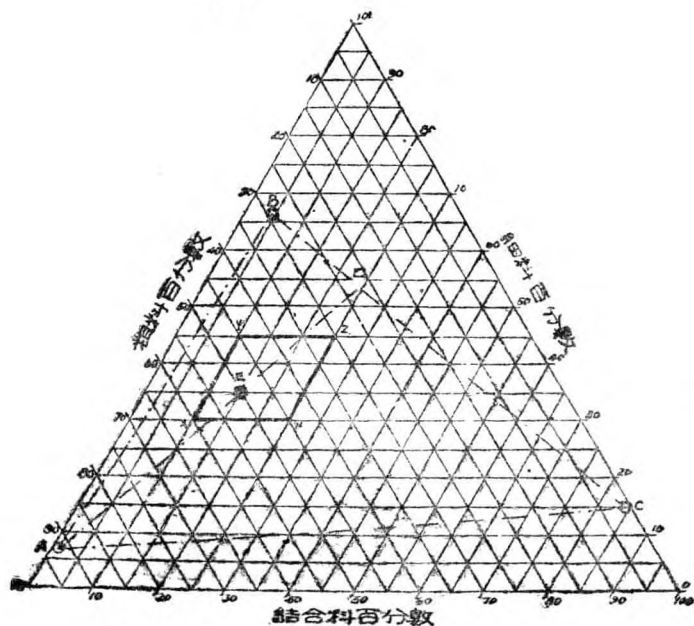


圖 78. 三角形圖解決定最佳土壤成分

材料用量 每公里所需用材料，在建築時，應有大約準備，以便配合。依試驗結果，路面壓實材料，平均每方 2.26 公噸。A 類材料，浮鬆時平均每方 1.49 公噸；B 類材料，每方 1.61 公噸；C 類材料，每方 1.19 公噸。如路面寬度 3 公尺，厚度 15 公分，則

每公里所用材料總重 = $3 \times .15 \times 1,000 \times 2.26 = 1,020$ 公噸。
如此可知每類材料，每公里應用若干。但在目前我國，以重計算極難，只能代以體積計算。雖則準確程度較遜，因環境所許，不得不如此。故

$$\text{每公里 A 類材料} = \frac{1,020 \times .365}{1.49} = 246 \text{ 公方,}$$

$$\text{B 類材料} = \frac{1,020 \times .435}{1.61} = 303 \text{ 公方,}$$

$$\text{C 類材料} = \frac{1,020 \times .15}{1.19} = 129 \text{ 公方.}$$

第四節 級配沙石路面之鋪築法

級配沙石路面之鋪築，在美國均假手於機械，惟我國則因缺乏機械器材，不得不假手於人工。茲將機械鋪築法與人工鋪築法並列於下：

機械鋪築法 機械鋪築法在美國目前採用者有二，即拌和機法 (plant mix) 及路上拌和法 (road mix) 兩種。

(1) 拌和機法 此法之主要條件在能於沙石料產區中採得適當結合料，使沙石與結合料均能就近覓得，不必遠運，方合於經濟。沙石料可於河灘上掘得，或可掘自岸旁。拌和機之形式有如拌三合土機，

惟尺寸較大。先將各產區沙石結合料樣品加以試驗，以規定其應用數量，如前節所述。惟結合料往往結成塊狀，應先使之晾乾，然後用輾或耙(harrow)輾碎之，再加入拌和機拌之，俾能混合均勻。沙石料未加入拌和機前，先用旋轉篩(rotary screen)除去大於一吋之材料，拌和後之材料直接裝入汽車中運至路上。此法鋪築最為簡捷便利，惟理想石廠頗難尋得，且設備費用亦較大。

(2)路上拌和法 路上拌和法所用之機械，主要者為平路機(mortor grader)及齒耙(tooth harrow)兩種。

其逐步建築法如下：

- (1)將沙石黏土運至路肩，堆成小堆，
- (2)將黏土運至路旁，攤開使之漸乾，
- (3)將乾黏土用輾輾碎，至全部材料能通過一吋篩至少80%，以上須能通過#4篩，
- (4)用噴水車將路基噴潮，
- (5)將四分之一之沙石及結合料平均鋪於路基上，
- (6)用平路機及齒耙將攤於路基上之材料均勻拌和，
- (7)一面灑水使材料略潮，
- (8)再加入四分之一沙石及結合料，
- (9)重複以前手續至全部材料盡鋪於路上，但在最後一層上無灑水，
- (10)整理路容使有適當路拱，然後用壓路機，或車胎壓路車壓實之，
- (11)壓實後如路容仍有不符規定處，應更加整理，然後灑水於其

上，再行最後輾壓，

(12)新成路面經第一次大雨後恆發生有車轍，蓋路面尚未完全壓實，應更加整理，重新輾壓。

人工鋪築法 機械鋪築法，自始至終莫不假手於機械，僅用少數工人管理機械而已。惟在機械缺乏之處，鋪築法不得不假手於人工。著者屢次實驗用人工鋪築之經驗，以用下述程序最為妥當。

(1)開挖路槽：按路面厚度開挖路槽，但如路基土質堅硬，或路基過低應行提高者，則可不挖路槽，兩肩填土，至與路面厚度相等。

(2)鋪底層塊石：如路基排水情形不良，或土壤毛細作用過強，則應加鋪路面底層。底層石塊之尺寸不得超過十五公分，並須夾雜有小石塊以充塞縫隙。鋪後用四公噸以上鐵筒往返輾壓以求堅實。

(3)堆料：先將路面分為若干段落，段長十公尺（簡稱一盤），然後用量方框將堆積於路旁之沙石料，依照實驗結果之數量量入路槽中，每十公尺為一段落。惟每段所需材料數量雖係根據實驗室計算結果，然因採取樣品時或不能代表該處材料，或因運料時錯誤，監工人員應視實地情形將材料成分酌予增減，如有疑問應將材料覆驗其成分。

(4)拌和：拌和時工人不可過多致妨礙工作，不可過少致工作遲緩。每盤以用工人十人為最宜，分為四人持鐵鏟，四人持板鋤，二人持鐵耙專司拌和材料。拌和時由持鏟工人將粗細料向路槽一邊洒開，持耙及鋤工人即將鏟過之料加以拌和，同時加入乾結合料並灑水，其方式如拌洋灰。

(5)打碎結合料：天然黏土多呈塊狀，用時應先晾乾之，然後用

木槌打碎之，使全部通過一公分篩。如因天氣潮溼，結合料不易乾燥，不能打碎，則可將結合料溶化於水中，拌和成漿，加入混合料中。

(6) 輾壓：混合料完全拌和完畢後應將樣品取出，送實驗室試驗，以斷定混合料之級配與塑性指數等是否合乎規定。然後將混合料平均攤於路槽中，使具有 1 : 20 之路拱(crown)。然後用壓路機或四公噸以上之洋灰輾筒以人力拉之，往返輾壓至完全堅實為止。如輾壓時路面過潮，可略加乾沙以免混合料黏於輪上；如路面過乾，則可略灑水使之潮潤。

級配沙石路面在歐美各國雖風行已久，惟在我國尚屬少見。著者於 1940 年，在樂西公路樂山至龍池一段，首次大規模鋪築此項路面，成效尚佳；惟該路目前車輛尚少，尚未能斷定其在繁重車輛狀況下之情形如何。級配沙石路面普通僅能支承每日 200 左右之車輛。如車輛密度超過此數，則應加以處治，或加用潮解化學物或加瀝青處治。詳細施工方法於下章敘述之。

第十三章 潮解化學物對於路面之作用

車輛行駛於普通良好狀況之礫石路或級配沙石路時，如在路面略潮時，則其密度因車輛之壓實而增加，但如在路面乾燥時，則路面細料被車輪揚起，混合料之數量漸減少，結果則路面鬆動。若路面混合料中細料減少過多，則路面有漸趨毀壞之勢。

因此，如路面永遠能保持潮溼狀況，則土壤之結合料能結合其粒子而不致分散，在車輪壓力下可將石料壓實。故車輛行駛愈久，混合料中之粗料與細料結合料結合愈固，而路面亦愈穩定。路面之潮溼

度不可過低，亦不可過高，過低則路面鬆動，過高則路面生軟易顯車轍。晴時路面愈乾燥，則於雨後愈顯潮溼，蓋路面過乾，則發生極細之裂縫，雨時水分即由此裂縫侵入混合料中。反之，若晴時路面略呈潮溼，則不致發生裂縫，雨時水分亦無從侵入內部，大部水分可由路拱排去。

潮解化學物(deliquescent chemicals)能保持溼度，故可加於土壤中以保持其溼度。最常用之潮解化學物有氯化鈣(calcium chloride)及氯化鈉(sodium chloride)，間亦有用氯化錳(magnesium chloride)者，但其效果如何尚在研究中。氯化鈣之功用在於吸收空氣中之水分，於乾燥時更放出所吸收之水分，氯化鈉則僅能保持土壤中原有水分。氯化鈣對於土壤有潮解及電解(electrolysis)兩種作用，氯化鈉對於土壤則有電解與結晶(crystallization)兩種作用。

氯化鈣用於路面建築之多遠過於氯化鈉，普通以氯化鈉路面較氯化鈣路面為硬，較為乾燥，塵土亦較多，其實二者之功用無甚差別。氯化鈣之所以廣用於美國者，因氯化鈣公司對於此法之研究不遺餘力，並廣加宣傳以增其銷路。氯化鈉之功用則在近數年來始注意及之，將來氯化鈉之應用或將駕於氯化鈣之上。

第一節 氯化鈣之功用

遠在1907年拜倫氏(Austin T. Byron)已建議用潮解化學物為止塵劑(dust preventive)，但氯化鈣之功用在1916年始為公路學者所公認。近年美國各州對於氯化鈣之研究更不遺餘力，在美國公路研究所(Highway Research Board)領導之下，各州均先後成立

試驗室。修築試驗路，專事研究(一)氯化鈣對於路面蒸發率之關係，(二)對於路面潮溼後之蒸發率。(三)潮溼時所漏失氯化鈣之數量等問題。至1934年司徒氏及顧林氏(L.C. Stewart and W.R. Colling)代表通化學公司(Dow Chemical Co.)更大規模設室內試驗路，室內更設有仿造風雨陰晴現象之設備，及種種不同車輛行駛情形，氯化鈣之應用原理至此乃大明。以下述氯化鈣對於級配沙石路面之種種作用。

相對溼度對於水分吸附之影響 氯化鈣在普通狀況下能溶解於由空氣中所吸收之水分，所吸收水分多寡因空氣之相對溼度(relative humidity)而變。相對溼度為大氣之含水與大氣最大含水量之比。在露點(dew point)時或飽和時大氣之相對溼度為100%，此時所含之溼氣因氣溫而變，暖空氣每單位體積所能含之溼氣數倍於冷空氣每單位所能含之溼氣。當相對溼氣在40%時，每磅氯化鈣能吸收1磅之溼氣，在75%時能吸收2.2磅，在95%時能吸收9磅。換言之，即溼度愈高，則所吸收之水量亦愈多，同時氯化鈣溶液亦愈淡。氯化鈣溶液之濃淡因溼度而變，溼度高則起吸附作用(absorption)，溼度低則起蒸發作用。例如午時空氣中之相對溼度降低，則氯化鈣溶液漸漸失去水分，至達到原有溼度時為止。在晚間如空氣中之相對溼度增高，則氯化鈣溶液由空氣中吸取水分。

表26為每磅商業氯化鈣(77—80% CaCl_2)在不同相對溼度下，所能吸收之水分。氣溫之高低與吸水數量無干，但高溫時吸水率(rate of absorption)較在低溫時為速。

表 26.

相 對 溼 度 百 分 數	每 磅 CaCl_2 所 能 吸 收 水 分
30	0.75
40	1.00
50	1.20
60	1.50
70	1.95
80	2.85
85	3.34
90	5.25
95	9.00

氯化鈣之氣壓較低於水之氣壓 液體之氣化作用，因氣溫增加而增加，任何液體在一定氣溫下均有一定之氣壓(vapor pressure)，亦為液體蒸發之量度。氯化鈣本身並無氣化作用，而氯化鈣溶液之氣壓較水之氣壓為低，因之氯化鈣溶液較水難於蒸發。當氯化鈣溶液與較其本身蒸度為高之空氣相接觸時，則溶液由空氣吸收水分。溶液濃度因吸收水分而降低，同時溶液之蒸發作用與空氣之溼氣壓力達於平衡。換言之，即此時氯化鈣溶液之氣壓等於空氣中所含之溼氣壓力。圖 79 表示氣壓、氯化鈣溶液濃度與氣溫變化之關係。例如水之氣壓在 85°F 時為 30.4 公厘，氯化鈣溶液在 20% 時氣壓為 26.8 公厘，在 50% 時則為 12.8 公厘。

氯化鈣增加土壤之溼氣黏性 氯化鈣能使路面潮溼已如上述。此外氯化鈣尚能增加土壤分子之黏結力，蓋土壤粒子間之黏結力除由結合料供給外，尚賴粒子間之薄溼氣膜之作用（見第七章）。氯化鈣溶液所供給溼氣膜之黏性較水為大，因此氯化鈣不但為優良之止

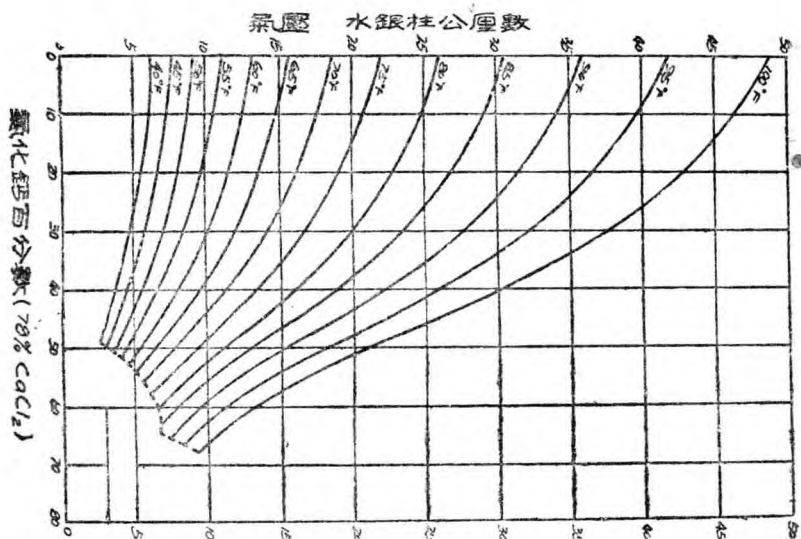


圖 79. 氣壓、氯化鈣溶液與氣溫變化之關係

塵劑，更能增加土壤之穩定。

雨水對於氯化鈣穩定路面之作用 當天氣乾燥時，土壤中氯化鈣漸升至路面，天雨時一部分水分侵入路面中，同時將氯化鈣溶液帶入路面下。當混合料空隙被水或黏土所充滿時，雨水不能更行透入，而向兩旁排去，其能侵入路面下之水分並不多，因之氯化鈣溶液不致有被水沖至路基下之虞。

基交換 欲知氯化鈣、氯化鈉及其他化學物對於土壤有何種化學作用，學者應對於電化學(electro-chemistry)有相當研究。農業家及礫器學家，對於此層早已注意，在此為篇幅所限，不能盡述其種種對於土壤穩定之重要關係，使氣體凝結於所接觸之固體表面上之現

象，謂之吸附現象(absorption phenomena)，如因吸附作用而起化學或游子作用，謂之基交換(base exchange)，宇宙間所有物體均具有帶電性(electrical property)，如膠體溶液之具有布郎運動(Brownian movement)也。土壤之電荷(charge)係由殼外之電荷而定，此殼外更有一相反電荷之殼，如圖 80 所示。

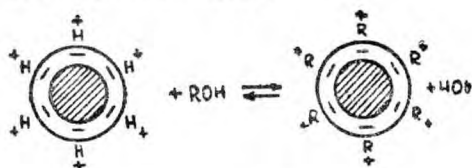


圖 80. 土壤電荷之排列

表面吸附有氫原子之膠體，謂之氫膠體(hydrogen colloid)；有鈣原子之膠體，謂之鈣膠體(calcium colloid)。如氫氧化鈣 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 通過氫膠體，則鈣被氫所替而成鈣膠體，所放出之氫則與 $(\text{OH})_2$ 化合為水。加氯化鈣於土壤時，其基交換作用有助於土壤之穩定。斯博勒(R. C. Schappler)氏關於此點有以下之解釋：

膠體表面附着之游子，不但有影響土壤之塑性指數，並影響及其氣壓及其與黏土遇水時之膨脹性。此種種現象對於土壤之穩定關係甚大。今若利用土壤之基交換量(base exchange capacity)，可改變土壤之性質使其具有優良黏性。對於某種土壤可選擇一種陰向游子(cation)與之交換，結果或可使土壤之膨脹減小，塑性指數升高，氣壓降低。

第二節 氯化鈉之功用

氯化鈉之劑能改進土壤性質早為農人所知。1907年拜倫氏曾論及田海水為止塵。惟截至 1931 年前雖屢有用食鹽為鋪築路面之建

議、但迄無顯著成效。1932年拿弗斯克亞(Nova Scotia)州用海水灑於路面上以止塵土，成效甚著，同時闡明食鹽保持溼氣之功用。繼之有萬國食鹽公司，及加那大國家研究院等，其中研究最力者為伊諾教授 (Professor F. H. Eno) 及瑞斯博士 (Dr. H. Ries)，茲將氯化鈉對於土壤之作用分述如下：

保持水分作用 食鹽溶液與氯化鈣溶液相似，均有較水為低之氣壓。食鹽溶液之蒸發率較水之蒸發率為遲緩，但食鹽僅能保持土壤之水分，而不能由空氣中吸收水分，此其與氯化鈣溶液不同之點。瑞斯博士對於食鹽保持水分之作用，作有如表 27 之實驗。將不同分度之食鹽加於黏土土壤中，測其在空氣中與在爐中所失之水量。

表 27.

食 鹽 成 分	0	3	6
在空氣中烘乾 24 小時後所失之水分百分數	14.7	9.93	3.85
更在 105°C 爐內烘 6 小時後所失之水分百分數	0.25	2.83	9.78

瑞斯氏更用沙土質黏土作如表 28 之試驗。沙土之空隙較黏土為多，其蒸發亦較易也，先將土壤和以多量之水，加以 6% 食鹽，然後將樣品烘乾於空氣中，凡 12 小時，移入爐內烘乾至重量不變。表內土壤中所餘之水分，用爐內烘乾土重量表之。

表 28.

	水 分 百 分 數		
	混 合 後	在空氣中 48 小時	在空氣中 120 小時
沙土質黏土	26.9	2.19	1.5
沙土質黏土加 6% 食鹽	24.1	7.2	2.2

結晶作用 土壤中之氯化鈉溶液漸漸蒸發，其溶液之濃度亦隨之漸增，終達於飽和狀況。此時氯化鈉結晶體漸由溶液中分出，此結晶之食鹽形成一硬殼，使水分不能更行蒸發。同時結晶體充滿土壤之空隙，使其收縮性減少，因之土壤之穩定性增加，小土壤之空隙減。食鹽能減小土壤之收縮，一部係由結晶作用 (crystallization action)，一部係由基交換作用。

壓實土壤密度 食鹽之保持水分作用，在壓實食鹽溶液土壤時最為顯著。土壤之塑性因食鹽之作用而減小，故壓實時能得較大之密度，其質點間之結合膜亦較薄，凡此等等均有增加土壤穩定之作用。

圖 81 為土壤中氯化鈉百分數與壓實土壤密度之關係。由圖可

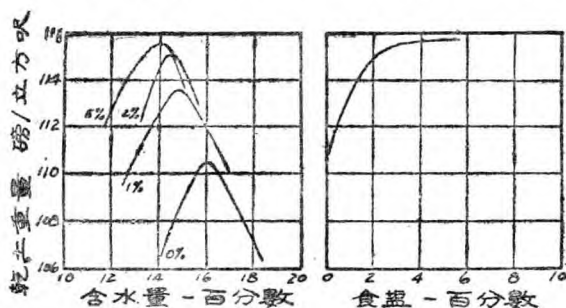


圖 81. 土壤中氯化鈉百分數與壓實土壤密度之關係。

知氯化鈉成分愈高，最佳含水量愈低，每單位體積之重量愈高。

圖 82 為電解化學品與壓實土壤密度之關係。由圖可知加次硫化鈉 (sodium hyposulphite)、氯化鈉、氯化鈣與氯化鐵 (ferric chloride) 等均有增加土壤密度之作用，惟加矽酸鈉 (sodium silicate) 則減小其密度。

對於黏土之收縮膨脹、塑性指數及水混值等關係 瑞斯氏謂如加食鹽於黏土中可減小其體積收縮，略增其收縮限度，而不影響及其

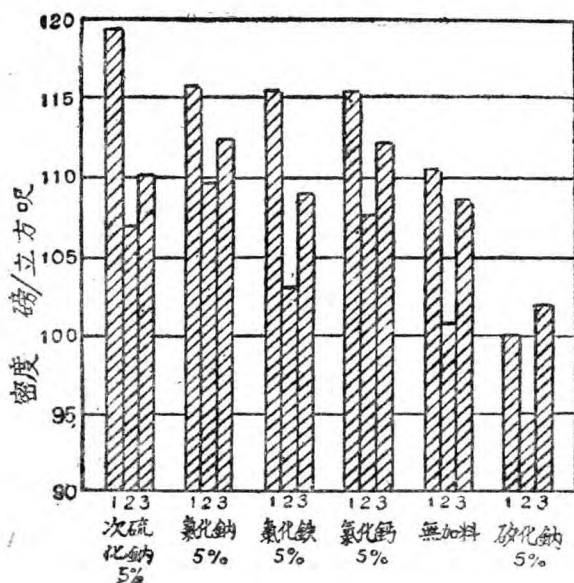


圖 82. 各種電解化學品與壓實土壤密度之關係

實地含水量，換言之，即加食鹽於黏土中，可使其溼時膨脹減小乾時收縮減小，黏土之塑性指數因食鹽而減低，但不甚顯著。著者用濾過 # 40 篩之倫敦黏土(London clay)，試驗其水混值(slaking value)、收縮限度、膨脹性及塑性指數等物理性與食鹽之關係。

(1)水混值 加食鹽於土壤中，食鹽之電解作用可增加土壤對水之抵抗力，以含有不同食鹽成分之土壤模型浸於水中，觀察其腐碎之時間，此時間即其水混值。在約 5% 食鹽時黏土之水混值最高，

即其對於水之抵抗力為最大，更加食鹽則其水混值反形減小，至28%時其值與不加食鹽之黏土相同。蓋少量食鹽加於黏土中，其基交換作用可增其抗水力，但若加鹽過多，則黏土之質點被其分離，致減少其黏性，其水混值亦銳減。

(2)收縮限度 黏土中食鹽成分與其收縮限度之關係，在5%以下之食鹽對於土壤之收縮限度影響甚微，在5%以上則收縮限度之值略增。

(3)膨脹性 約3%食鹽之膨脹最少，食鹽過多與過少均能增其膨脹，又經二十四時後，其膨脹度均約相同，是食鹽僅能減少其膨脹率(rate of swell)，而不能減其最後膨脹。

電解作用 氯化鈉有更換膠體黏土之電場(electric field)之作用，而使土壤呈羊毛狀(flocculation)。故含食鹽之黏土較不含食鹽之黏土黏性為大，受車輛碾壓後之密度亦較大。當雨水降落於氯化鈉處治之路面時，表面食鹽溶解沉於路面下；若路面黏土所含之食鹽，因多量雨水盡沉於路面下，則黏土略事膨脹，生羊毛狀作用。此膨脹之黏土及膠體將土壤中之空隙塞滿，使雨水不能更行透入路中，而由路面排去。此種作用可減少食鹽之下沉。天氣乾燥後食鹽更因毛細作用升至路面，發生再結晶作用(recrystallization)。

減低水之凝固點作用 氯化鈉與氯化鈣均有減低水之凝固點作用，故氯化鈉或氯化鈣均可防止路面冰凍之病。

第三節 潮解化學物之應用

潮解化學物之能保持路面水分，防止塵土，穩固路面已如上述。

潮解化學物可應用於礫石路及級配沙石路上，尤以用於後者成效為著。以下述潮解化學物之敷用法 敷用數量及保養法。

潮解化學物之敷用法 氯化鈣與氯化鈉之功用大致相同，其敷用法亦無二致。若用拌和機拌和，混合料可直接加入機中。若用路上拌和法，可將所需要潮解化學物裝於播散車 (distributor) 中，平均灑於混合料上。再用平路機、齒耙等拌和使之均勻。在人工鋪築法中，加潮解化學物更為簡便，僅需於拌和時加入一定之數量。氯化鈉敷用時亦可化成鹽水潑於混合料中。在海濱海水取用便利處，更可直接用適當濃度之海水。

如路面厚度較大，則化學物可僅參和於路面上半層或中層，如路面厚度超過八公分，則其下層可不必參用。

潮解化學物之物理性與化學性 用於路面之氯化鈣，按美國材料實驗所之規定 (A. S. T. M., designation D-98-34) 應具有下列之物理性與化學性。

物理性:	經過 3/8 吋篩者	100%
	留於 1/4 吋篩者	不得超過 20%
	經過 #20 篩者	不得超過 10%
化學成分:	CaCl ₂ (無水)	不得少於 77%
	MgCl ₂	不得超過 0.5%
	全部鹼性氯	不得超過 2.0%
	其他雜質	不得超過 1.0%

普通用於路面之氯化鈉均係岩鹽 (rock salt)，實際上無論井鹽、海鹽均可應用。顆粒較粗之鹽最適於應用，蓋貯藏時不致因吸收水

分而結塊，因之可較細粒之氯化鈉分布均勻。

物 理 性：	留於 # 4 篩	不得超過 2%
	# 8 篩	不得超過 90%
	# 8 篩	不得少於 65%
	經過 # 30 篩	不得超過 2%

以上百分數增減不得超過 5%。

若用鹽水則可不論其級配，溶於水後一律可用。

化學成分： 所含氯化鈉應在 98% 以上

潮解化學物敷用數量 潮解化學物敷用數量在美國各處不一，氯化鈣之敷用每平方碼約 0.6 磅，氯化鈉敷用數量每平方碼每 3 吋厚約 2 磅。印第安那州規定每平方碼每吋厚用 3/4 磅，成效亦佳。按前節 1) (見 p.171) 食鹽成分在約土重之 4% 時水混值最高，過此則銳減，實際應用時亦應以此為限度。

路面養護 潮解化學物穩定路面如經常時期之乾燥氣候，則車輛之磨蝕可使混合料中之細料逐漸磨去，遺留較大之顆粒，此種情形一經發現即應加以處治，或加鋪瀝青穩定層，或再加食鹽處治。加鋪瀝青方法於第十五章述之，加鋪食鹽之方法與第一次加食鹽相同，惟在冷潮之天氣不可加化學物，應待天氣晴後再加於路面上。加化學物最適宜之時為雨後乾燥天氣，此時若將路面乾土鏟去，下部之溼土可增加化學物之溶解速度。若在旱時則化學物應在早晨當空氣相對溼度高時加入為宜。若將化學物於雨後立時加入，則大部材料，將被水沖刷去，徒費力而無益也。

春季養路之時，路面或須全部修整，必要時可將路面翻鬆，再加

拌化學物。翻修時則應在雨後，或雨停止時行之，因在乾時，路面甚硬不易施工也。修補路面孔隙時可於每立方碼加含 100 磅至 150 磅氯化鈣之混合料填補之。

第十四章 水泥土壤路

水泥穩定土壤法，始自摩飛博士(Dr. Chas. H. Moorfield)，摩氏於 1932 年在美國南加羅來那(S. Carolina)州公路局實驗室中，首以水泥加於土壤中，以研究其凝結後之結果。更於戶外鋪築 2 平方呎厚 6 吋之路面以觀察其受車輛及氣候之影響。加水泥於土壤中，其作用與混凝土全不相同，不可相持並論。水泥在混凝土中，重要作用為水化，而水泥土壤之主要作用則在使每個土壤顆粒外均包有水泥，水泥使土壤顆粒不致因受外界情形而起變化，如膨脹、收縮等作用。換言之，水泥在土壤中之作用在穩定土壤之顆粒及增強顆粒間之膠結力，惟若土壤中之黏土顆粒過多，則勢必需要大量水泥始能穩定之，是失去經濟意義矣。土壤具有下列之物理性始能宜於水泥土壤路面之用。

- (1)液性限度低於 30，
- (2)塑性指數低於 25，
- (3)含黏土成分低於 35，
- (4)在最高密度時定體積土壤中之固體百分數應在 60 以上，
- (5)土壤應具有正規之普拉脫氏曲線(見第八章)。

公路路線所經過地域之土壤，十之八九均能利用為水泥土壤路面之用，但如遇含黏土過高之土壤或腐泥土、泥炭等，則應另求他種

土壤，始能獲良好結果。

1933 年底摩氏鑒於屢次試驗之成功，更鋪築長 528 呎寬 22 呎之試驗路一條。路基土壤為沙土質黏土，此段試驗路經一年車輛行駛後，在其上更加一層瀝青，迄今雖略有損傷而大致尚無恙。1935 年復有約翰村實驗(Johnsonville experiment)，規模較前更巨。此後經波德蘭水泥公司(Portland Cement Co.)成立專部專事研究此項路面，對於試驗方面及工地實施方面均有顯著之改進，採用此種路面者亦日多。

水泥土壤路面不但可應用為低價路面，此外尚可應用於飛機場跑道、城市人行道、高級路面之路肩、小城市街道等。

水泥土壤路面之建築可分為二部，即實驗與施工，茲分述如下：

第一節 敷用水泥數量之測定

土壤水泥路面所應加入水泥之數量全視土壤性質而定，故在決定用水泥數量之前應先將土壤加以試驗。若路線所經過地域土壤成分均勻，則僅須採取一二種樣品加以試驗即可決定；反之，則須事先作土壤測量，採取種種不同樣品送實驗室研究。土壤測量方法已於第三章述及，茲不復贅。先將送入實驗室樣品之常數測出以資參考，然後再作水分與密度關係試驗及耐久試驗(durability test)。

水分與密度關係試驗 此試驗係本普拉脫氏壓實土壤原理而定。普氏壓實土壤原理及其實驗法已於本書第八章述及。在此實驗，以不同水泥成分加於土中而測定其最佳含水量。水泥成分在此組試驗中為土重之 4, 6, 8, 及 10%。由圖 83, 可知加有水泥之土壤，其水

分與密度之關係，與不加水泥之土壤相似。普通加水泥後土壤之密

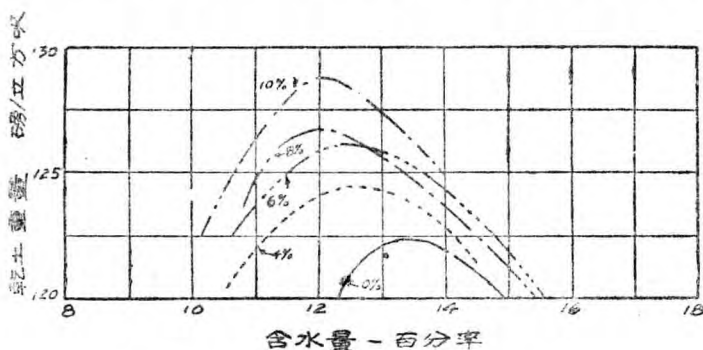


圖 83. 含不同成分水泥之土壤水分與密度之關係

度較未加之前為略高，其最佳含水量則略減。

耐久試驗 耐久試驗可分為兩部：一部為乾溼試驗(drying and wetting test)，另一部為凍化試驗(freezing and thawing test)。耐久試驗之目的，在求能抵抗自然界之乾溼與凍化作用時應用之最低水泥成分。

先將普拉脫氏壓實儀，用標準壓實法在最佳含水量時壓製土壤水泥模丕，每個不同水泥成分應製模丕四個備用。模丕壓成即由壓實儀中移出，稱其重量量其體積後，置於鐵絲架上，以便移動。然後將樣品移入高溼度室中，使水泥能逐漸凝固，七日後再稱其重量量其體積。最後選取 No. 1, No. 2 二樣品為乾溼試驗之用。

將兩個樣品一併浸於室溫下之水中凡五小時，移出後量其體積稱其重量如前，然後再將樣品移入 160°F 之電爐中，烘乾凡 42 小時。量 No. 1 樣品之體積稱其重量如前，以檢查其經過第一週乾溼試驗

後之體積與重量變化。將 No. 2 樣品用鐵絲刷，刷去表面浮土，再稱其重量，以檢查其經過第一週乾溼試驗後所損失之土壤重量。如是重覆十二週乾溼試驗，如在最後一週樣品之重量與體積並無重大變化，其土壤損失百分亦不劇，是表示所用之水泥成分足以穩定該土壤。

更將其餘兩個樣品置於水箱中，使溫度降至 -10°F 以下凡 22 小時，稱其重量，量其體積，用四層厚吸墨紙墊於每個樣品下，使水分經過吸墨紙，藉土壤毛細引力使樣品漸漸解凍，如是經過 2 小時，然後取出 No. 1 樣品檢查其體積與重量，取出 No. 2 樣品用鐵絲刷，刷去表面浮土，再稱其重量，此為第一週凍化試驗。如是重覆十二週，如在最後一週結果仍良好，是表示所用水泥成分足以穩定該土壤。

由耐久試驗之結果，可決定某種土壤應用水泥數量若干始能穩定。例如某種土壤若加以 8% 水泥，則在十二週乾溼試驗後，土壤重量損失達 16%，體積變化為 0.2%，含水空隙較製模時高出 1.2%，在十二週凍化試驗後，土壤重量損失達 2.4%，體積變化為 3.2%，含水空隙較製模時高出 3.4%，此種結果當然認為不滿意。

設將上述土壤水泥成分加至 10%，則在乾溼試驗，土壤重量損失減至 4%，體積變化減至 0%，含水空隙較製模時減低 1.2%；在凍化試驗，土壤重量損失減至 7%，體積變化減至 15%，含水空隙較製模時減低 1.2%，此種結果可稱滿意。

由以上結果，可知欲穩定該種土壤須用 10% 水泥，再由水分與實度實驗求出用 10% 水泥時，最佳含水量為 14%，重量為每立方呎 112 磅。實驗室即將此結果通知工地，依照結果施工。如實驗室結果

無錯誤，實際施工亦可有相當成功把握。

第二節 水泥土壤路面之鋪築法

自摩飛氏發明水泥土壤路面以來，至今已十餘年之歷史，其鋪築法經波德蘭水泥公司悉心研究，逐步改進，至今已規定有標準鋪築法。鋪築時所用工具，與級配沙石路面所用者大同小異，間亦有用混合機(mechanical mixer)者。至於用人工鋪築不假手於機械，在我國亦曾試辦，具有相當成效。水泥土壤路面之厚度普通為6吋，但若係加鋪於穩固之碎石路面上，則其厚度可減至2吋。此種路面若不加以表面處治，每日至多能承載500輛汽車。茲將水泥土壤路面詳細鋪築法及施工細則分述如次：

機械鋪築法 機械鋪築法所用之主要工具為犁路機(subgrade roter)、圓盤耙路機(disc harrow)、彈齒耙路機(spring tooth harrow)及容量一千加侖灑水車。其逐步建築法如下：

(1)翻鬆路基 用翻土機將路床土壤翻鬆，如路面厚度為6吋，則可翻至5吋為止。此部工作可用人工代替，惟如路床坡度平整，則用犁路機較為迅速。

(2)輓碎土壤 輓碎土壤最有效之工具為盤狀耙，用耙將已翻鬆之路基土壤往返輓壓至完全輓碎為止。砂土質土壤之顆粒往往膠結甚緊，須少加水始能輓碎。如在雨季輓碎之土壤，在拌和水泥之前，應用油布或油紙妥為遮蓋，以防土壤受水復結成塊狀。

(3)鋪篩水泥 水泥係盛於桶或布袋中，每袋水泥體積為一立方呎，應預先計算每呎長路面所需水泥數量，然後將水泥按需要數量

放置於路基上，排列整齊，使拌和時不致有水泥不均勻之患。例如某土壤應用水泥 10%，路面厚度為 6 吋，則每平方碼應用水泥 $3 \times 3 \times$

$\frac{6}{12} \times \frac{10}{100} = 0.45$ 袋。如路寬為 20 呎，則每呎長路面應用水泥 $20 \times$

$\frac{6}{12} \times \frac{10}{100} = 1.00$ 袋。如是，則設路長 100 呎，需用水泥 100 袋，可分

成四行排列，每行放置水泥 25 袋。水泥排列後即可將袋打開，將水泥灑於土壤上，同時用四齒耙，用人工將水泥略拌入土中以防飛揚。

(4) 乾拌水泥 可用齒耙二架專司拌和工作，一架在路邊行駛，一架在路中間行駛。彈齒耙路機拌和之後，可助以圓盤耙路機拌和，拌和後應檢查土壤，視其顏色是否均勻，深度是否有不齊整處。乾拌為水泥土壤路面鋪築程序中最重要之一部，如拌和不均勻，則成效難滿意。

(5) 灑水溼拌 加水可用普通噴水車，但噴水桿 (spray bar) 之長度以與路寬相等為最適宜，否則灑水有不勻之弊。土壤之含水在未加水之前以低於最佳含水量百分之一、二為最理想。一面加水，一面應立時用齒耙及盤狀耙往返拌和之，拌和時應注意不使土壤結成團，同時注意用水量使之均勻分布。用水量可使較最佳含水量略高一二分，以備蒸發損失。在溼拌過程中，用水量寧過於規定而不可不及。

(6) 輾壓 水泥土壤路面輾壓應用羊蹄輾，俾能得最堅實之輾壓。惟羊蹄輾之使用只限於具有黏性之土壤。若沙土土壤則壓力傳布過速，反不易壓實，不如用車輪輾壓為利便。羊蹄輾輾壓後之路面，表面雖堅實，然仍不平坦，須加用普通圓面壓路機輾壓之。惟經羊蹄

輾轆過之路面，其凹凸之處非平面壓路機所能消除，故應先用釘耙 (spike tooth) 將表面一層厚約半吋之路面翻鬆，然後再用汽車輪輾壓。車輪輾壓在若干種土壤上極為有利，蓋可免土壤黏結於平面壓路機上。用車輪輾壓後，再將路面略事修整，使合乎規定路拱，然後再用最後之平面兩輪壓路機輾壓。壓路機之重量不可過輕亦不可過重，過輕則單位壓力不足，過重則表面易起縐紋不能平坦。普通每吋輪寬之壓力應在 100 磅左右為最適宜。

(7) 路面完成 平面壓路機輾壓完成後，路面即應蓋以溼土一層，厚約 2 吋，或鋪厚約 4 吋之稻草一層，保護層之作用，在防止水泥土壤路面水分蒸發過速，同時使水泥有充分水化時間。溼土或稻草上應隨時用水噴灑，使之恆在潮溼狀況。如是經過七日，可將保護層除去，掃清路面，即可通車。

人工鋪築法 在我國因機械設備不足，鋪築此種路面不得不假手於人工。著者於 1937 年五月在西蘭公路咸陽至乾縣之間首次試用人工鋪築此項路面，該段路基土壤為 A-4 組粉沙土，含粉沙量約 70%，塑性指數約為 10，最佳含水量 20%，加水泥量定為 6%，惟當時因實驗室設備不全，舉凡耐久、凍化試驗均不能實驗，故鋪築後即發現用水泥量較少；同時路面上所行駛之車輛多係鐵輪大車，故鋪築不久，路面即呈裂紋。鑒於第一次之失敗，著者復於 1939 年於重慶上清寺築水泥土壤路面一小段，此段路面係鋪築於原有碎石路之上，土壤係取邊坡，係 A-2 組沙質黏土，路面厚度僅 4 吋，用水泥量為 14%。此次鋪築因實驗設備較為完備，築路工具如壓路機等亦均較前完備，故成績頗為滿意。路面經每日約 300 餘車輛行駛，迄今約二

年仍無任何破損之處。人工鋪築水泥土壤路面法經著者多次改進，得下述之步驟：

(1)開挖路槽 依照路面厚度、寬度開挖路槽，挖出土壤應堆於路肩旁備用，然後用壓路機輾壓路槽使之堅實。

(2)輾碎土壤 路面所用土壤可取自路槽所挖出者，如路槽土壤凝結過緊，不易輾碎，則可取附近借土，所有借土處均應預先指定，經詳細試驗後始能取用。先用鐵鍬或木錘將土壤結塊部分完全打碎，然後將全部土壤通過一公分半篩，凡留於篩上之土壤不得用之，並隨時除去草根及易腐敗物體，將已篩後之土壤平攤於路基上，其厚度為壓實厚度加百分之二十。

(3)鋪篩水泥 用水泥量之計算法一如前所述，水泥排列於路旁，每隔一定距離一桶，篩水泥時用細米籮，使之平均灑於路面上各部，同時用鏟略翻土壤，不使飛揚。

(4)乾拌水泥 先將路面分為若干段，每段長度為15呎至20呎，每段用工人八名，六名用鐵鍬將路槽中之土壤及水泥翻向兩旁，即由持鐵耙之工人二人，將水泥與土壤妥為拌和至少四遍，至水泥與土壤完全混合均勻為止。如有風時，篩水泥工作應與乾拌工作同時進行，以防水泥飛散。

(5)灑水溼拌 先在工地測定土壤之含水量，再根據實驗測定之最佳含水量百分數，算出應加水若干加侖，將應加之水量出，貯於大水桶中，置於路旁備用。加水時應用噴壺灑酒均勻，一面灑水，一面拌和，拌和方法一如乾拌時。拌和若干次至完全均勻無乾溼不一處而後已。總計加水拌和時間以不超過半小時為宜，以防水分蒸發與

水泥凝結。

(U) 輾壓 拌和完畢後，將混合料攤平，並使符合規定路拱，然後用鐵夯擊使之堅實，最後用雙輪壓路機輾壓之。

機械鋪築法與人工鋪築法互有優劣，其採取全在經濟上，如在美國機械發達人工昂貴，自應利用機械鋪築。至於我國種種公路建築機械均不能自製，且工價低廉，自應以用人工鋪築為佳。

人工鋪築與機械鋪築之優劣如次：

(1) 路槽深度 機械鋪築用盤狀耙開挖路基，其厚度雖細心管制，仍有不均勻處，因之水泥成分亦隨之有多寡。至人工鋪築，則路槽深度極為準確，無深淺不一處。

(2) 輾碎土壤 人工鋪築法所有土壤均經過規定之篩，土壤顆粒均勻，非機械所能及。

(3) 機車掉頭處 機械鋪築時最大之弱點即在機車掉頭處，此段路面往往不能照其他段落施工如意，亦為路面最先破壞之處。人工鋪築法則可免去此種地段。

(4) 輾壓 羊蹄輾非用牽引車拖引不可，在無牽引車處無法應用，故人工鋪築時之輾壓遠不及機械法之堅實，此為人工法之最大弱點。若能在人工鋪築中加用羊蹄輾輾壓，則結果必佳。

水泥土壤路面經車輛行駛半年或一年後，表面漸呈磨蝕現象，應於此時在面上加鋪瀝青磨蝕層。鋪法先將路面用汽力刷 (power broom) 刷洗潔淨，再於每平方碼澆以 0.2 加侖柏油；柏油之黏度 (viscosity) 應在 4 與 8 之間，此層柏油能透入路面中深約 $\frac{3}{8}$ 吋，十日後更於其上加每平方碼 0.3 加侖水瀝青，並立刻於其上加每平方碼

2.5磅石屑，再用壓路機碾。水泥土壤路面經此法處治後可持久不壞。

水泥土壤路面之養護頗為簡便，如路面發現孔穴或因路基鬆軟而沉陷，可將破碎之路面清除潔淨，挖深至6吋至8吋，用同樣水泥土壤混合料修補。拌和修補材料時，可利用普通拌混凝土機(concrete mixer)拌和。修補後之孔穴可用鐵夯夯錘堅實。

如瀝青磨蝕層發現剝落之處，則應將表面一層瀝青材料完全括除清淨，至露出水泥土壤底面為止，然後用同樣瀝青材料照原作法修補。

第十五章 瀝青材料穩定土壤

瀝青材料 (bituminous materials) 之能用於公路建築早為一般學者所熟知，但以前不過利用瀝青之不透水性及其黏結力以為路面之磨蝕層。至於利用瀝青材料以改變土壤之性質使之穩定，則為最近十年來之發明。1927年南加羅來那州公路局首用各種不同瀝青材料拌和於沙土質黏土中以穩定之，成效甚著，至今十餘年來實驗工作未嘗中斷。其後1928年在那比被斯加 (Nebraska) 州公路局引用瀝青材料穩定沙丘地帶之土壤，1935年佛羅打 (Florida) 州引用瀝青穩定 A-3 組沙土質土壤，1937年米蘇里 (Missouri) 州引用瀝青穩定粉沙質土壤，均有相當成就。各州所用之瀝青材料各有不同，其鋪築法亦不一致。經美國公路總局年來之悉心研究，此種路面之原理、實驗法及鋪築法漸趨健全，迄今雖仍未能成一種完備之科學，但距此時期當不遠矣。

穩定土壤之瀝青材料，包括有地瀝青 (asphalt) 及柏油 (tar) 二

種。常用之瀝青有乳化劑(emulsion)及輕製(cut back)二種。輕製係瀝青與瀝青蒸餾液(distillate)溶合而成。凡汽油、煤油、石腦(naphtha)等均可用為溶解瀝青成輕製。輕製所含地瀝青成分自55%至82%不等。凡用汽油溶解地瀝青者稱為速凝輕製油(rapid curing)，用煤油溶解者稱為中凝輕製油(medium curing)，用不揮發或揮發遲緩之油溶解者為慢凝輕製油(slow curing)。乳化劑為地瀝青與肥皂及水之混合物，地瀝青成分約55%。柏油亦視其黏性之大小，分為T.M.及T.C.等。柏油及地瀝青來源不同，故性質亦迥異，同時絕對不可互相混亂。以下各節分述瀝青材料穩定土壤原理、用油量之多寡、用油之種類及施工方法。

第一節 瀝青材料穩定土壤原理

地瀝青在瀝青穩定土壤路面中之作用，主要在減少侵入土壤中之毛細水分，同時增加土壤顆粒對外界水分侵入之抵抗力。欲達到上述之作用，瀝青在土壤中必須均勻分布；瀝青與天然含水較低之土壤混合極難達到均勻狀況，必須先加大量水於土壤中以輔助瀝青之分布。黏性大之瀝青需水最多，黏性小者需水較少，即使有乳化劑時亦須稍加水俾能易於混合。瀝青與土壤混合均勻後混合料水分漸漸蒸發，由液狀變成塑狀，由塑狀變成固體，此時環繞於土壤顆粒四週之溼氣膜厚度亦逐漸減薄，與土壤質點發生極大引力。同時溶於水中之瀝青質點因溼氣膜與土壤質點之引力，得與土壤質點密切接觸，一部環繞於質點之外，一部則吸入土質點內。瀝青之被吸入土壤質點內，可由實驗證明，蓋無論用任何提煉方法，不能恢復已混合入

之瀝青。

瀝青混合土壤之所以能減少膠體化學之活動，一部係由於膠體質點被瀝青所包裹，一部係由於瀝青根本改變膠體之化學性質。同時瀝青封閉土壤中毛細管之口，並增加土壤密度，使毛細水分不易滲入混合料中。總之，加瀝青於土壤中，無形中等於改變土壤之性質，使若干不適於路面建築之土壤得充分利用。

各種土壤均可用瀝青穩定之，但對於沙土質及粉沙質土壤穩定較易，而黏土質則較為困難。蓋沙土與粉沙土均係單顆粒質點，瀝青易於附着其上，而黏土土壤質點往往聚成一團不能分開，故必須使瀝青完全包裹黏土質點團之外使其作用等於單顆粒質點土壤。黏土質土壤是否易於碾碎全視黏土之塑性而定，某種沙土質黏土乾後極易碾成沙狀顆粒，另一種沙土質黏土則碾碎極不容易。前者可用高黏性之瀝青穩定之，後者則必須用稀瀝青加以充分水量始能混合均一。

柏油穩定土壤之原理與地瀝青大致相同，柏油具有強表面張力，故能深貫入土壤之空隙及其毛細管中。柏油附着於土壤之力甚強，附着之時間愈久愈為堅固，蓋柏油含有一種化學成分謂之極化合物（polar compound）。此極化合物漸次與土壤之化學成分化合，終於柏油與土壤間成一種不溶解之化合物，故其附着力甚強。

柏油之種類甚多，應用何種全視土壤性質而定。若土壤係沙土質，含粉沙及黏土成分不多，則該土壤並不甚需要柏油防止水分之侵透，而僅需柏油使其分子穩定，對於此種土壤應用富於黏性之柏油，如 TM-1, TM-2。此種柏油黏性雖大，用以拌和沙土並無困難。若土壤係黏土質，則當其含水量在塑性限度之下時，其分子結合力

甚大，無需柏油之協助，僅需柏油保護其表面使水分不能透入，蓋水分一旦透入，含水量超過塑性限度，則黏土所具之結合力亦將失去，對於此種土壤應用不甚具黏性之柏油，如 TC-1, TC-2 等。若土壤係粉沙土質，黏土成分低，則柏油之功用不但在使土壤分子結合，並在使水分不能侵入，對於此種土壤不應用過黏之柏油，亦不應用過稀之柏油，TC-3, TC-4 柏油最爲適宜。此種土壤需柏油量最多，有時爲經濟起見，可加沙石料於土壤中以減少需柏油量。

第二節 瀝青材料之應用數量

用瀝青材料穩定土壤時，對於所用瀝青材料最經濟之數量自應有規定。用油過少，則不能抵抗水分之侵襲；用油過多，不但不經濟，且混合料過軟，減低其穩定程度。故對於每一種土壤均應先計算各種適當之油量。實驗用油量之方法向未有標準規定，馬更生(McKesson)氏將乳化劑處治之樣品置於盛水皿中，使土壤毛細管吸收水分，然後用赫拜氏穩定儀(Hubbard-field stability test)測其穩定度。羅德(Rhodes)氏則先將柏油處治之樣品浸於水中，然後用赫拜儀測其穩定度。此外尚有用拉力或壓力試驗測量瀝青處治樣品之穩定度，惟其結果尚不及赫拜儀之可靠。

至于所需瀝青材料之數量因土壤質點量及細粒土壤性質而變，單位體質中土壤之顆粒減少，則其表面面積增大，因之土壤中黏土與膠體成分增加，則油量亦增加。此種現象不但可由實驗測得，且可用經驗公式(empirical formula)表出。茲將赫拜儀試驗法及試驗公式計算法分述如下。

穩定試驗 先將土壤樣品烘乾，研碎使之全部通過 # 40 篩，然後用水拌合，再由該土壤瀝青混合物中提出約 8 克，用每平方吋 200 磅之壓力，壓成一直徑 10 吋大之圓筒，晾乾於空氣中凡二十四小時，再移入溫度在 105°C 之爐中，俟其完全乾後，再稱其重量，然後將樣品浸入水中，數小時後由水中取出稱其所增加之重量，即樣品所吸收水分之重量。如此屢記樣品重量之增加，至其重量不變為止。普通在七八小時內，其重量即不再增加。若該土壤之塑性限度在 28 以下，則樣品之最大吸收水分量亦應在此數之下，若超過此數，則應增加柏油之成分。若該土壤之塑性限度在 28 以上，則樣品之最大吸收水分量應在 28 左右，而不得超過 28 過多。如此屢試即可求出應用柏油之數量。此法不甚準確，而且較費時，不如用赫拜穩定儀。

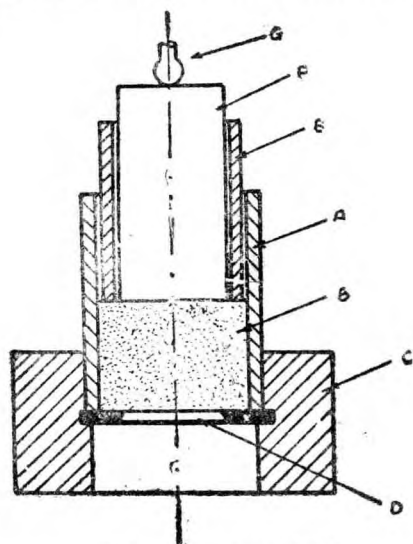


圖 8: 赫拜氏穩定試驗儀

赫拜儀之構造如圖 84。A 爲一圓筒，內徑 1 吋，高 $1\frac{1}{2}$ 吋，筒之一端裝壓實混合料 B，混合料下接有圓環 D，圓環支於座架 C 上，其內徑爲 0.875 吋。圓筒 A 中套有鐵管 E，以導塞筒 F 之下壓。試驗時先將 15 公分土壤混合料置於圓筒 A 中，將筒置於溫度在 25°C 之爐中烤乾，凡 30 分鐘，使樣品之溫度均勻，然後以每平方吋 3,300 磅之壓力將筒內樣品壓實，施壓力之時間爲 1 分鐘。壓實後立時將筒裝入穩定儀中，在塞筒上加壓力，壓力係發自一等速電動機，故其壓力極爲均勻。塞筒下壓速度規定每分鐘 1 吋，壓力之大小可由指針上讀出。當壓力到達某種強度時，圓筒內之土壤混合料之抗剪力不能支承，樣品中間一部分土壤由圓環口擠出，此時指針所示之壓力，必突然減少，此時指針之讀數即爲土壤之穩定值。如試得之穩定值合於規定，則所加之油料即屬適合。

試驗公式 由赫拜穩定儀實驗，得知在某種限度內，如土壤中填縫料 (filler) 增加，則其穩定度亦增加。設沙土土壤，其中含通過 # 200 篩之材料極少，此種土壤在未用瀝青穩定之前，應先加填縫料以增其穩定度，凡粉沙、石灰粉、火山灰 (volcanic ash) 等細料均可用爲填縫。如用 M.C. 類瀝青，則通過 #200 篩材料需在 18% 左右，如用 S.C. 類瀝青，則通過 #200 篩材料需在 25% 左右。

計算混合料中應用瀝青材料之公式甚多，然大半係適用於拌和粗粒石料。下列公式爲那比利斯加州最近試得之公式，用於計算穩定土壤所用瀝青數量較爲妥當。

$$p = AG(.02a) + 0.04b + 0.06c + Sd,$$

式中 p = 混合料中應加之瀝青重量百分數。

a = 留於 #50 篩材料之重量百分數，

b = 通過 #50 篩留於 #100 篩材料之重量百分數，

c = 通過 #100 篩留於 #200 篩材料之重量百分數，

d = 混合料中之有效填縫料之重量百分數，即用沖洗法(wash test)通過 #200 篩材料之重量百分數，

S = 有效填縫料之吸收油料及油度係數，

A = 混合料之吸收油料係數，每種混合料不同，普通為 1，

G = 比重係數，得自將混合料體積比重除 2.62。

式中各項除 S 外，均可立時求得。欲得 S 之值，需先作浮標試驗(float test)，試驗水在浮標時間(float time)為 1,000 秒時，混合料之填縫瀝青比例(filler-bitumen ratio)，則 S 之值為

$$S = \frac{0.27}{\text{填縫瀝青比例}} \quad (\text{普通 } S \text{ 之值在 } 0.15 \text{ 左右}).$$

如此求得 p 之值後，再需求應加之瀝青油料重量百分數，可用下列

公式：
$$N = \frac{100p}{100-p} K.$$

式中 N = 混合料中應加之瀝青油料重量百分數；

p = 混合料中應加之瀝青(bitumen)重量百分數；

K = 油料蒸發折減係數，

在 S.C. 類 $K=1.0$ ，

在 M.C. 類 $K=1.1$ (當全部蒸餾液為 15—20% 時)，

$K=1.15$ (當全部蒸餾液為 20—25% 時)，

在 R.C. 類 $K=1.15$ (當全部蒸餾液為 15—20% 時)，

$K = 1.2$ (當全部蒸餾液為 20—25% 時).

設有某種土壤, $a = 50\%$, $S = .15$,

$b = 20\%$, $A = 1$,

$c = 15\%$, $G = 1$,

$d = 15\%$,

則 $p = 0.02 \times 50 + 0.04 \times 20 + 0.06 \times 15 + 0.15 \times 15 = 4.95$.

如有 S.C. 油, 則

$$N = \frac{100 \times 4.95}{100 - 4.95} \times 1 = 5.2\%$$

即用 5.2% S.C. 瀝青輕製油可穩定之。

瀝青材料應用數量全視土壤種數及油料種類而變, 已如上述。大凡用土瀝青數量最少為 2%, 最多亦鮮有超過 11% 者; 用柏油及乳化劑則有達 14% 者。

第三節 瀝青穩定土壤之鋪築法

瀝青土壤混合料之鋪築法大都係假手於機械, 通用者有路上拌和法及拌和機法二種, 而以前者最為常用, 茲分述如次。

路上拌和法 拌和時所用之機械, 與鋪築水泥土壤路面所用者大致相同, 包括有圓盤耙路機、彈齒耙路機及多刃刮路機 (multiple blade drags)。若土壤中所含之通過 # 200 篩材料多於 8%, 或係黏土質粉沙土質土壤, 則以用圓盤耙路機拌和較為便利。若土壤係沙土質, 則以用多刃刮路機拌和為宜。鋪築之步驟如下:

(1) 準備土壤 用犁路機將路床土壤翻鬆, 其深度以適合於壓

實後路面之厚度。土壤中所有草根雜物均應剷除清淨，並將土壤之結塊者打碎，使土壤之顆粒最大者不超過半吋。如土壤中應先加粗料或填縫料，應於此時加入，用犁路機拌和均勻，然後將路床上所有鬆動土壤刮至路肩上，用平路機(blade grader)刮平路基，使合乎規定尺寸，再將路肩上土壤平均攤入路槽中，堆積至一定厚度。

(2)加水 土壤中最理想之含水量係普拉脫氏最佳含水量。可先測得此量及土壤中原有含水量，然後依照計算所得水量用灑水機均勻灑入土中，同時用圓盤耙路機等拌和工具拌和之。有時如所用油類黏度過高，需要加水至最佳含水量之上，始能拌和均勻。

(3)加瀝青材料 瀝青材料可用壓力噴油機(pressure distributor)噴於土壤。噴油機之構造如圖 85。所噴出油量及機車行駛速度，均能管制，故所噴之油能均勻分布於土壤中。每次噴油量不得超過

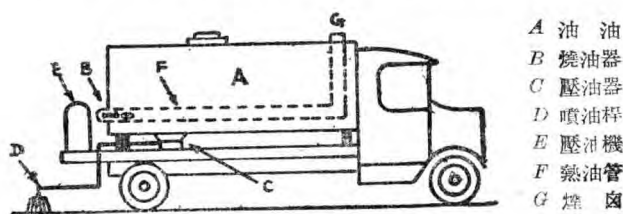


圖 85. 噴油機

每平方碼 0.5 加侖，並須俟第一批瀝青完全拌和均勻後始能再噴第二批油。

(4)拌和 噴油機噴油後，立時用多刃刮路機及辟耙往返拌和之，至瀝青與土壤完全混合顏色均勻而後止。然後用平路機將混合料刮向路槽兩旁，再刮向中心，如此反覆數遍，至瀝青蒸餾逐漸揮發，

混合料黏度適合於輾壓時為止。

(5)輾壓 拌和完畢後，用平路機將混合料攤平，使符合規定路拱，然後先用羊蹄輾輾壓之，繼用平面壓路機壓實之。路面完成後，可於其上再加一層與混合料所用同樣瀝青，每平方碼約用 0.2 至 0.3 加侖，於其上加以粗沙或石屑，再施輾壓。

拌和機法 拌和機通常多採用流動式(travelling plant)，預將土壤堆置於路中心。拌和機將路材料鏟起，輸送至機器頂上漏斗中，再由漏斗將土壤用搬運帶(belt conveyor)漏過一定大小之孔口，以控制土壤之體積，再經過另一漏斗，使與瀝青材料滲和，瀝青材料係用壓力均勻噴出，最後土壤瀝青均入混合室中，用機力拌和後，仍吐於路床上。混合料經過相當溼治(curing)時期後，用圓盤耙或其他工具翻動之，以防土壤中瀝青蒸餾之揮發。然後將混合料攤平輾壓，如前所述。

瀝青材料種類至為複雜，至今美國各州公路局曾利用各種不同瀝青材料為穩定土壤之用，其中成效或良或窳，雖經歷年研究，仍不能完全明瞭此種路面成功或失敗之原因，但瀝青材料穩定土壤之原則，則已確定，至少用此法鋪築路面底層確已相當成功。南加羅來那州對於此種路面，積十餘年之經驗，得下列之結論。

(1)土壤含黏土及粉沙土成分，高至 45%，仍可用 R.C. 類油穩定之。

(2)土壤含黏土成分如過高，拌和時可加水至最佳含水量之上，使易於拌和，但必須俟水分減至最高含水量時，始能輾壓之。

(3)如含水量及輾壓方法，施工時能嚴密控制，則用瀝青數量可

以減少。

(4)拌和機法較路上拌和法均勻，同時材料不致散失，在大規模鋪築此類路面時，應儘量利用之。

(5)顆粒過細之土壤，應在加瀝青材料前，先加粗料，以減少瀝青材料數量。

(6)顆粒過大之土壤(通過#200篩成分過少者)，應在加瀝青材料前，先加填縫料以增加混合料之穩定度。

第十六章 其他穩定土壤法

本書第八章至第十五章所述種種穩定土壤方法，如壓實穩定土壤、排水穩定土壤、級配穩定土壤、化學物品穩定土壤、水泥穩定土壤、瀝青穩定土壤等實已包括目前歐美各國公路所採用之穩定土壤方法之有成效者。惟公路所經過之地段範圍極廣，沿路天然或人工之出產品不同，有時因材料關係，上章所論之各種穩定方法仍不能解決困難。尤其是在目前我國抗戰期中，各種原料如水泥、瀝青、氯化鈣等均極缺乏，公路學者在此種環境下必須就可能得到之原料加以研究，以代替其他已知之原料。本章所述，不過舉其數種可能穩定方法，至於其詳細研究，則有賴學者之繼續努力。

第一節 燒土穩定

燒土穩定原理，係因土壤加熱燒煉之後，發生物理及化學變化。當溫度加熱至 100°C 時，土粒空隙間所含水分散去，表面吸附水膜，則需在 100°C 至 400°C 之間，方能蒸發，同時在此溫度，吸收熱力之

後，土壤晶層結構，亦開始分裂。黏土礦物之公式，雖為 $Al_2O_3 \cdot ySiO_2 \cdot xH_2O$ ，其中 xH_2O 水分，實為晶層結構內之 OH 電子。當晶層結構分裂之時，OH 電子化為水分，礬土及砂石個別分化。如再將溫度加高至 $700^\circ C$ 以上時，則砂石復與礬土化合而成矽化礬。燒土物理性質之變化，視燒煉溫度及時間而異。溫度愈高及時間愈長者，則土質愈形堅硬而不易脆裂，其黏結力及穩定性亦愈強。惟在工地燒煉，應顧及燒窯之容量及燃料之經濟，在可能範圍內，儘量維持最高可能之溫度及最長之燒煉時間。

燒土穩定土路方法遠在 1890 年，美國費城某公司曾加以研究，其法先將路床挖掘深約 60 公分，將鬆土堆積曬乾十日，挑選大土塊築成直徑 4 公尺半，高 60 公分之圓形土窯。下置稻草及木柴，再將準備燒煉之土壤堆蓋於上，成一高約 2 公尺半之塔形，燒畢俟其冷卻後回鋪路上。

近年澳大利亞 (Australia) 修築某公路時，其地土壤係黑色黏土，

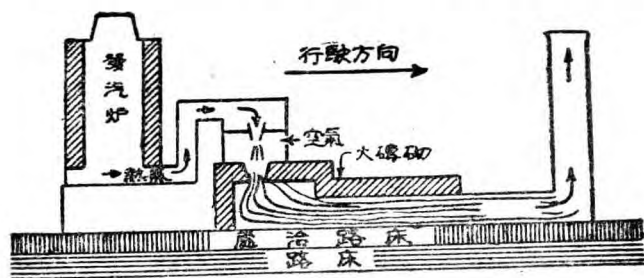


圖 86. 燒土機

沙石產源復極遙遠。希得尼 (Sydney) 城某公司發明燒土機一具，如

圖 86, 機具一發氣爐, 燃料可用木材或煤炭, 所生之熱氣與空氣混合後, 流至路床上直接烤乾路床土壤。機能自動以每小時 10 呎速度前進。鋪築時先將路床土壤挖鬆約 4 吋, 然後通過燒土機使土壤烤至最熱時機始漸漸向前移動, 如用此機晝夜不停, 每星期可成路面約 10,000 平方呎, 熱力可透入約 6 吋, 烤乾後用汽輾輾碎所有黏土塊, 灌以黏土漿, 再加輾壓, 即可通車。

第二節 石灰穩定

石灰之作用與水泥初無二致, 我國舊有建築物運用石灰為膠漿歷數百年而不壞者甚多, 是石灰為良好之穩定材料殆無疑問。惟石灰不易凝乾, 不似水泥之有一定之凝乾時間及一定之抗壓力。利用石灰鋪築路面, 在我國已有相當歷史, 四川各縣利用石灰滲和於礫石中加以夯擊, 所成路面光滑平坦有如混凝土路面, 惟路面抗翦力過弱, 不能勝任重載汽車。蓋抗翦力構成之因素, 一為黏結力, 二為內磨阻力, 而石灰本身則此二者均甚缺乏也。

石灰土壤路面之作用, 與水泥土壤路面大致相同, 惟石灰所需之溼治時間較長, 且不若水泥本身即具有黏結力, 故以石灰穩定土壤所得之效果, 須視土壤所含黏土成分而定。用定量之石灰穩定土壤作乾溼試驗, 結果知土壤中黏土成分與損失重量百分數之關係成一拋物線, 如圖 87。土壤中黏土成分過多或過少, 均不宜於石灰穩定土壤之用, 過多則缺乏內磨阻力, 且需大量之石灰, 過少則缺乏黏結力, 雖加石灰亦無良好之結果。土壤加洋灰或石灰後作乾溼試驗之結果, 其損失土壤之百分數均隨灰量增加而減少, 惟用灰量在 6% 以下時,

洋灰之功用遠大於石灰；在 9% 左右時，兩者之功效因土質而異；在 12% 以上時，則兩者之功用無甚分別。

鋪築級配沙石路面或泥結碎石路面時，加以 4% 至 8% 石灰，對於路面之凝結極有協助。至於如何利用石灰作大規模鋪路之用，則尙有待研究。

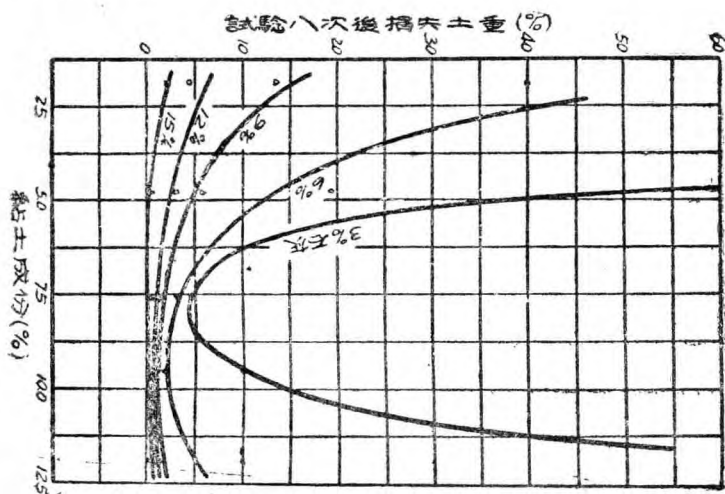


圖 8. 石灰穩定土壤與乾溼試驗

第三節 糖漿殘液處治

於甘蔗製糖時，所餘之糖漿謂之糖漿殘液 (molasses residue)。係一種黑色液體濃漿，含有松香 (resinous) 與無機物。此殘液若與石灰混合，可成爲一種黏結力極強之結合料，稱爲糖化鈣 (calcium sucrate)。美國公路局在 1908 年，在麻省曾試驗用糖漿殘液混合油與石

灰拌入土中，結果證明此混合料之結合力極優。

印度地處熱帶，出產大量甘蔗，利用糖漿爲土壤穩定劑亦曾加以研究與試驗。糖漿穩定試驗路，在海得拉巴德至密柏克斯公路一段長十公里之土路上曾行試鋪，路面先事整理平坦，再用犂略爲翻動，每平方公尺均勻散播糖漿與水一比五之混合料（糖漿二公斤加水十公斤），路面浸透後，俟其乾至微溼程度，以壓路機壓之，即可通車，但須隨時洒水，並以刮路機修整路面，加糖漿之層數爲二層至四層，每平方公尺用量由 $3/4$ 公斤至 3 公斤，視土壤所含水分而定；如含水過多，最好於加糖漿之前在原路面先鋪五公分至十公分之黏土層，再灑水少許拌和之。糖漿在路面中不但有結合力，且能吸收空氣一中水分，使路面表面溼潮。通車後結果優良，足證糖漿殘液爲良好之土路穩定劑。

糖漿殘液不但可用爲土壤穩定劑，亦可拌合級配沙石路面，或灌入碎石路面，以增進其黏結力。我國沿海及川中各處產蔗區至廣，若能利用糖漿殘液製成結合料運銷各處，則不僅能改進路面，亦可作爲其他建築材料，以符物盡其用之旨。

第四節 廢硫磺液處治

用硫磺過程法(sulphite process)製木漿(wood pulp)時，木質分出後餘留一種硫磺液(waste sulphite liquor)，將此溶液蒸發後，可得一種膠狀沉澱，爲良好之結合料。

1910年赫拜氏實驗巖石之破碎力，發現如用濃硫磺液代替水，則其破碎力可由每平方吋 300 磅增至 2,000 磅。用硫磺液代水鋪築

路面固甚佳，但硫磺易溶於水中，故所成路面每於雨後呈軟。為解決此種困難，赫拜氏用一種防水劑加入其中，使之不易溶於水中，同時不致減低其結合性。所用之防水劑為半瀝青路油(semi-asphalt road oil)及食鹽。如使用時環境良好，赫拜氏已證明濃硫磺液加防水劑為半永久性結合料，最宜於碎石或其他相似路面之建築。

近年製木廠所附產之廢硫磺液已有大量產出，市面上稱為「瑞利」(Rayley)，經美國公路局試驗結果頗佳，將來引用為級配路面或其他路面之結合料必有重大發展。

第五節 植物油處治

一切植物油均有防水作用，若滲於土壤中可以增加土壤抵抗外界氣候襲擊之力，實無疑義。植物之種類甚多，如桐油、棉花子油、大豆油等，均可利用以處治土壤。惟各種植物油之價格因地而異，運用時首應注意及經濟問題。著者曾用大豆油(soybean oil)滲合於土壤中，再用火燒法使之速乾，成績尚佳，惟成本過高，不能推廣。桐油在我國西南各省產量甚豐，其性質較他種植物油為濃厚，亦較易乾，故用為處治路面最為適宜。桐油(tungoil)可直接拌入土壤中，亦可混合他種原料製成路面磨蝕層。茲分述如下：

拌入土壤 拌和之方法與桐油瀝青相同，所需數量視土質而異，多至30%，少則2%，試驗結果認為

(1) 桐油與土壤混合後，能增進土壤之防水侵害。

(2) 桐油配合成分增加，則土壤之吸水性可以減小，而穩定性可以增加。

(3)桐油與瀝青柏油材料施之於土壤中，有同樣作用。

(4)土壤含有多量黏土者需用桐油較多，以減輕其吸水性，砂質土壤則反之。

混合他種原料 桐油混合松香製成膠泥爲陳本端君所發明，將桐油加熱後，以松香溶解其中，成一混合物，酷似瀝青膠泥 (asphalt cement)。其性質隨混合時之溫度及松香與桐油二者用量之比率而變更，重慶市區曾用此混合物試鋪路面一小段，惟因鋪築工具欠佳，且松香桐油之比率及混合時溫度或未臻適當，故結果不甚良好。

吾人目前對於植物油處治路面尙無徹底之研究，惟植物油將來必可成爲一種重要路面建築材料，實可斷言。研究植物油處治路面時，除對於土壤之基本原理應有詳細之認識外，對於乾溼試驗、凍化試驗、赫拜穩定試驗、膨脹試驗、水化試驗、衝擊力試驗等亦應面面顧到，先在試驗室中有切實之研究與實驗，然後於實地建築時始有把握。

除上述各種穩定土壤法外，尙有鈣赫莫 (calcium humate) 可以處治礫石路，矽酸鈣 (calcium silicate) 可增加粒狀土壤之結合力。電化學處治 (electro-chemical treatment) 通強電流於黏土質土壤中，可使之硬化。公路學者應視實地土壤情形及出產品細加研究，利用工業附產品及天然材料爲路面之用。例如雲南之紅土，川滇路赫章附近土法煉鐵之附產焦，西蘭路大盤山之白堊土，滇緬路龍陵附近之泥化石 (chliche) 等均可利用。

