

86.11
HRJ
1

86.11
HRJ
1

土 壤 力 學

Soil Mechanics

SI 版

(上 冊)

原著者：T. William Lambe
Robert V. Whitman

譯述者：洪如江 郭俊良 徐裕昌
詹勳山 馬堅志 何鏗鏘
楊彰文 趙國華

科技圖書股份有限公司



卡爾·德植基 (Karl Terzaghi) 氏，於 1883 年 12 月 2 日生於布拉格 (Prague, 捷克首都)，1963 年 10 月 25 日卒於美國麻省溫却斯德郡。常被尊稱為土壤力學之父。氏之早年生涯，盡付於搜尋土壤工程問題的合理解答。在 1925 年出版一本著名的土壤力學書而告成功。此書公認為土壤力學的不休之作。

1925 至 1929 年，曾在麻省理工學院、主持美國曾創土壤力學計畫，奠定了土木工程中重要訓練的項目。1938 年改任哈佛大學教席，講授工程地質學。

德氏一生事業，可在“土壤力學的理論與實數” (From theory to practice in soil mechanics 1960) 一書可窺具一斑。所有 1960 年以前氏所發表的文獻目錄 (256 種)，均分別錄入。

德氏獲得的榮譽至夥，其中包括美國土木工程師學會的挪孟獎 (Nor-man medal)，1930, 1943, 1946 與 1955，並曾接受八個國家贈送名譽博士學位九座，選任國際土壤力學與基礎工程學會會長多年。

德氏在其創造土壤力學以來直至臨終之年，無日不在努力發展其深造的影嚮。當其臨終前二日尚孜孜工作其寫作生涯。德氏的著述中供獻是多方面的，其中最重要者，如壓密理論、基礎設計與施工、圍堰分析，與坍塌機構等篇。對專門職業方面的重大供獻，是接觸工程問題，給予教導並作示範。

為紀念德氏的偉業，美國土木工程學會創立德植基講座與德植基獎。

原 序

“土壤力學”一書；設計作為該課程的導引教本。以簡潔的筆調來描出真實基本而切題的土壤力學原理。羅列大量數字例題與習題，以幫助說明這些重要原理。這本教科書曾經用作土壤力學的大學程度與研究所的導引教本。雖然這本書主要是為學生而寫的，但亦可作為實踐躬行工程師們的參考書。

本書共分五篇，第一篇是講述在土木工程範圍內所遭遇到的土壤問題，並列出各種各樣土壤的行為。第二篇是描述土壤的本質，著重在顆粒間應力的傳遞。第三篇是以討論乾土為主，因為土壤行為的外觀，可由不含水的土粒間相互作用而得瞭解。第四篇是根據第二篇及第三篇所述的原理來建立土壤內孔隙水在靜態或在穩定態下流動的研究。第五篇是屬於土壤力學中最複雜的問題。孔隙壓力受到載荷的影響，導致孔隙水在土中發生的瞬時流動。本書的組織，使講述的內容順着次序逐步朝向複雜來建立其原理。

第三、第四與第五篇均用同一的格調。第一，各篇由若干章列論土壤行為的基本原理，然後再列出若干章說明應用這些原理來作實際的分析與設計，擋土結構、土壤邊坡與淺基礎等。例如，有關淺基礎，在第三、四、五各篇均有列論。特別另列深基礎與土壤改良兩章在第五篇中。這些以問題作中心的各章，混和了理論、實驗室試驗與以往實地得來的經驗，形成實用而強有力的分析與設計方法。但本書並未包容一切實際問題的細節。若干參考資料，均經分別列入，作為補充學習的指針。

本書所列的內容遠超過一本引導性教科書，故可由教師選擇其中基本原理部分來講述。我們已發現各種數字例題與實用問題，在引導課程中宜提早講解，最好排在最先八堂課中。我們曾安排這種早先課業，其內容列下，籍供參考。

1. 第一篇包括兩堂課，導引學生去學土壤力學，並使瞭解這門課的組織。

2. 第三章中包括較詳細節，第四至第七章只宜匆匆讀過。在以後發生問題時，再回頭參閱這些章節。

3. 第八章是說明若干基本方法來計算並展示這些應用。學生必需把

握這些技巧。第九至第十二章，包括若干關鍵性觀點，將有關土壤行為的資料與圖表及典型數值分別列入。這些章節亦可快速讀下去，着重在關鍵觀點就可。接着深入研究擋土結構（第十三章）與淺基礎（第十四章），每章均值得化上三至四小時講。第十五章提供日漸重要的土壤動力問題，可作為導引課業的補充讀物。

4. 第十六章着重有效應力的定義與運用法以及有效應力的探求，作為補充讀物。第十七章至第十九章的研究深度，應視其他相關課程，如流體力學的施教情形而定。第二十至二十二章，主要是敘述性題材，得儘快研讀以強調土壤行為的主貌。第二十三至二十五章需詳細研讀。可依教師的興趣與施教計畫選擇其教材。依筆者意見，只要從這三章中選取其中二章的一部分即可。

5. 第二十六及第二十七章，包含重要觀念與計算步驟，故需精讀。第二十八章也需細心討論，以瞭解排水式與不排水式行為的重要關聯。第二十九章及第三十章，大多是敘述性的，略讀即可。將省出來的時間精讀以後各章的精選題材。

在這引導課程中未及討論的題材，可使學生對進修課程發生興趣，也可作高級課程的參考資料。

讀者在本書中可看到六位土壤力學元老的照片與簡歷。這六位前輩對土壤力學供獻卓著，對後學者產生重大影響。另外，第二代的領導人物，有的正在日正當午，有的將對土壤力學發生重大影響。本書後附的文獻目錄，可資佐證。

在此感謝作者及出版家同意引用許多圖表。英國土木工程師學會，准許引用其“Geotechnique”雜誌中的材料。

本書早期工作的一部分，曾得福特基金會為改進工程教育而捐贈 MIT 的贈金給予支持，謹此誌謝。

感謝 MIT 土木系主任米勒（C.H. Miller）教授，鼓勵編著本書。同時並向 MIT 的同事們及同學們誌謝。他們在歷次手稿中，曾參預意見，並詳加檢討批評。特別是賴德（C.C. Ladd）教授與布朗威爾（L.G. Bromwell）教授，他們對本書曾提供大量評論。布朗威爾教授對於第二編第三十四章的修正極有貢獻。克力斯丁（J.T. Christain）教授對本書的理論部分，馬丁（R.T. Martin）教授對第二篇，阿波羅尼亞（D. D'Appolonia）博士對第十五及第三十三章協助良多。加州大學的米其（

J. K. Mitchell) 教授，伊利諾大學的席佛曼 (R. L. Schiffman) 教授
分別對第二篇及第二十七章提供有價值的討論。最後，向白麗子 (E Pe-
rez) 小姐及維雅諾 (AK. Viano) 太太致謝，她們不厭其煩的從事多次
手稿的打字工作。

T. W. Lambe. 藍 姆

R. V. Whitman. 惠德曼

國際制版序

原版“土壤力學”，曾使用各種單位制，這是由於本書的內容是從世界各地得到資料匯編之故。在此次新版的內容，將所有數量一律（儘可能的去辦）改用國際制單位，但其內容則一仍其舊未予增改。

國際制單位，在全世界大地技術工程界廣泛地採用着，包括若干英語系國家在內。此後將更為發展。學生就讀土壤力學需熟習國際制單位，是十分正確的，即使是從事工程事業，對此新制亦宜多多瞭解。事實上，從事大地技術的工程師們，早對公尺、公斤與呎、磅同樣熟悉，因此只要對新制單位中的力與質量間的區別細心研究即可。力或重量是以牛頓（newton, N）為單位。在這段過渡時間，宜將兩種單位制混着用。所以本書另加列一些換算表在附錄B中。

在原書中所列的數據，是用捨入進位以求簡單易記，故本版所列與原版並非完全相等。但這些真實資料是按着正確的換算因子折算的。

國際制簡寫為SI。是從1800年代的法國學者所創立的公制蛻變而來。首先在若干國家間認為有必要定出一種標準以資共同信守。在1960年起經過多次研討修訂簡化，定出此SI制。這種新制的實施由國際標準化組織（International Organization for Standardization, ISO）推行，國際標準協會則從事符號標準化、編印換算表等工作。在美國推行SI制的工作，現由民間組織努力推行中。美國代表向ISO投票贊成此項新制是美國國家標準局（ANSI）。1970年美國土木工程學會（ASCE）曾制定一方案，凡是學會的刊物，必需將SI單位與習用單位同時並列。一種完整的SI導引手冊，已由美國試驗與材料協會（ASTM）編訂出版。

在國際制中，基本度量單位為長度、時間與質量（另外有四個單位用於電學、熱力學、化學與光學）。長度的基本單位為m（米/公尺），有時亦可使用mm（毫米）。時間的基本單位為s（秒），有時亦可使小時、日與年。質量的基本單位為kg（公斤）。一千公斤稱為一，t（噸）。

質量是表示某物體內物質的量。物體的質量與地心引力無關。另外，重（weight, W）是指物體在某地點受地心引力的量。根據牛頓法則：

$$W = Mg$$

其中：

g 為重力加速度， M 為物體的質量。因為 g 值是隨地球表面所在而變，故物體的重，在地球各處略有不同。這些微的差別常被略視，取用標準的重力加速度（約為 9.806 m/s^2 ）作為換算質量為重量之用。

重量以力的單位來表示，而力的基本單位為牛頓（newton, N）。1 牛頓的力可使質量 1 kg 產生 1 m/s^2 的加速度。於是質量 1000 kg 的物體在地球上，具有 9810 N 重或 9.81 kN 重。若將物體加在一適宜的磅稱上，使其讀數為 1000 kg，我們稱此物體重 1000 kg。實際上，這種磅稱是在稱質量，至少是說，該處的重力加速度為標準值。

同樣，用來區分質量密度（mass density, ρ ）與單位重（unit weight, γ ）。質量密度（單位為 M/L^3 ）是指物體的密實度（density），而單位重，則為重力加速度的函數。故

$$\gamma = \rho g$$

國際制單位中的質量密度為 kg/m^3 。水的質量密度為 1000 kg/m^3 或 1 Mg/m^3 。水的單位重，在標準狀況下約為 9806 N/m^3 或 9.806 kN/m^3 。在工程計算時，大部分可採用 10 kN/m^3 作為水的單位重。

應力與壓力，是指每單位面積上的力。故其基本單位為 N/m^2 而非 kg/m^2 。通常使用 kN/m^2 ，或 MN/m^2 。在 1 m 深處水的壓力為 10 kN/m^2 。

在舊式公制中，力是用 kgf （kilogram-force）或 tF （ton-force）來表示。若干工程師經常在使用着，但未辨明其 kg 與 kgf 的差別。若將 9.806 作為 10，得其間的近視關係

$$1 \text{ kgf/cm}^2 = 10 \text{ tF/m}^2 = 100 \text{ kN/m}^2$$

如此，工程師們便可將常用的單位，例如剪力強度，立即換算成 SI 單位了。

T. W. Lambe 藍姆
R. V. Whitman 惠德曼

本書翻譯經過

本書由 MIT 大學的藍姆與惠德曼教授合著的名著。此書在 1969 年出版，運到台灣時已在 1970 年初。時同學洪如江教授方自英國進修返校，任研究所中等土壤力學課程，即以此書作為教本。旋經華將此書介紹給國立編譯館列為世界名著翻譯本，並經委請洪教授任翻譯工作，原期在一年內譯畢，再經一年排印即可問世。後因洪教授返校後即進行岩石力學試驗室的建立，對此譯事無暇兼顧，時作時輟，匆匆二年未能交卷，不得已商請編譯館同意解約，至為遺憾。其時土力試驗室同仁詹勳山、何鏗鏘、楊彰文等三同學共議繼續進行，認定各章分頭翻譯，旋以各人分別離校他就，所完成者僅及全書的一半，仍無法着手出版。及後洪教授二度去英進修，行前將彼等已完成部分的譯稿托華處理，經整理後發現尚未譯的各章，先托徐裕昌，馬堅志同學分頭譯出，其原譯稿中的圖表算例與說明附註漏列者，托郭俊良同學分別整補。同時得悉此書將出國際制版，預料內容將有所增易，故又鵲候二年。今年初得悉國際制版已出，故將原稿作緊急處理。因郭俊良同學工作甚忙，無法完成全部整補工作，不得已由華充任，經過半年來日以繼夜的工作，將全部譯稿整補完成。深幸有此機會得將全書作一深入的瞭解，引為平身一大快事。此書着手迄今先後達 9 年之久，幸而該書內容迄無大變動，故仍不失為一本優秀教本。深感一事之成，得之匪易。特誌始末以告讀者。

趙國華 謹誌

目 錄

原 序

國際制版序

第一篇 導 論

	頁數	譯 者
第 一 章 土木工程中的土壤問題·····	3	洪如江
第 二 章 土壤行為簡介·····	28	趙國華

第二篇 土壤的本質

第 三 章 土粒組合的描述·····	41	洪如江	郭俊良
第 四 章 土粒的描述·····	59	徐裕昌	郭俊良
第 五 章 土粒間的垂直正應力·····	73	徐裕昌	郭俊良
第 六 章 土粒間的剪力阻抗·····	89	徐裕昌	郭俊良
第 七 章 土壤的形成·····	108	徐裕昌	郭俊良

第三篇 乾土壤

第 八 章 土體內的應力·····	141	詹勳山	洪如江
第 九 章 應力 - 應變性質的試驗方法·····	170	詹勳山	洪如江
第 十 章 應力 - 應變性質的試驗方法·····	180	詹勳山	洪如江
第 十 一 章 非粘性土壤的剪力強度·····	204	馬堅志	郭俊良
第 十 二 章 應力 - 應變的關係·····	228	馬堅志	郭俊良
第 十 三 章 擋土結構與邊坡·····	249	馬堅志	郭俊良
第 十 四 章 淺基礎·····	303	馬堅志	郭俊良
第 十 五 章 土壤的動力載荷·····	355	馬堅志	郭俊良

第四篇 土內水 - 不流或恒流

第十六章	有效應力	375	何鏗鏘	郭俊良
第十七章	單向度的流體流動	392	何鏗鏘	郭俊良
第十八章	二向度的流體流動	418	何鏗鏘	郭俊良
第十九章	土壤透水性及濾層的必備條件	445	何鏗鏘	郭俊良
第二十章	排水式應力 - 應變性質通論	467		洪如江
第二十一章	排水式剪力強度	481		郭俊良
第二十二章	充分排水情形下的應力 - 應變 關係	504		郭俊良
第二十三章	有排水狀況存在的擋土結構	519	楊彰文	趙國華
第二十四章	有排水狀況的邊溝	560	楊彰文	趙國華
第二十五章	排水淺基礎	500	楊彰文	趙國華

第五篇 土內水 - 瞬流

第二十六章	不排水式荷重後所發生的孔隙壓力	525	何鏗鏘	趙國華
第二十七章	壓密理論	550	洪如江	何鏗鏘
第二十八章	充分排水與不排水的應力 - 應變 性質	580	詹勳山	趙國華
第二十九章	不排水剪力強度	706	詹勳山	趙國華
第三十章	不排水情況下的應力 - 應變關係	734	詹勳山	趙國華
第三十一章	排水狀況下的擋土結構與土壤邊 坡	748	詹勳山	趙國華
第三十二章	不排水情況的淺基礎	780	詹勳山	趙國華
第三十三章	深基礎	803	詹勳山	趙國華
第三十四章	土壤的改良	828	詹勳山	趙國華
附 錄	A 符號	845		趙國華
附 錄	B 換算	865		趙國華
附 錄	C 參考資料	875		趙國華

第一篇

導 論

本篇試圖給與初學者使其留意若干有關土壤力學真實而基本的觀念。第一章係描述一般土木工程問題的內容，而能用土壤力學原理達成目的者。第二章係解說給初任工程師們，應熟悉本書中敘述之各重要基本原理。



戴勞教授，1900 年生於美國麻州胡西斯德（Worcester）城，於 1955 年 12 月 24 日卒於同州阿靈登城（Arlington）。氏於 1922 年畢業於胡西斯德技術學院，就業於美國海岸大地測量局及新英格蘭電力公司凡九年。1932 年入麻省理工學院任土木工程系職直至 1955 年去世工作凡二十三年。

戴勞教授曾參加波士頓土木工程學會及美國土木工程學會有年。迄逝世當年曾任波士頓土木工程學會會長。1948 年至 1953 年曾任國際土壤力學基礎工程學會秘書五年。

戴勞教授溫文典雅，坦白熱誠，其從事於研究工作則細心而忠實。所著基本土壤力學（Fundamental of soil mechanics）中壓密理論、粘土剪力強度與斜坡的穩定分析等，均為其重大的供獻。論文“土壤斜坡穩定理論（Stability of earth slope）”一篇，贏得“波士頓土木學會最高榮譽費茲加特（Desmond Fitzgerald Medal）獎。基本土壤力學一書曾廣被採用作為教科書凡若干年。

第一章

土木工程之土壤問題

土木工程師在執業時，難免遭遇許多土壤問題，其類型不同，而重要性則一。或用土壤作基礎以支承結構物與堤壩；或用土壤作營造材料；或為開挖及地下道工程而設計擋土工；或因特殊工程而遭遇的土壤問題。本章所述，為處理諸問題的性質與範圍，以及相關的術語。並舉實例，說明土壤工程師的職責。

1.1 基 礎

每一土木工程結構——諸如房屋、橋樑、道路、隧道、牆、塔、渠、壩——皆需設於地面或地下。為要求結構物合用，必需有穩固的基礎。

若堅實土層接近地面，則可用展式基脚 (spread footing)，以傳遞牆、柱的集中荷重達於土層，如圖 1.1 所示。基礎使用展式基脚者，稱為展式基礎 (spread foundation)，以往，皆採用木材、鐵格、卵石塊等作為材料；目前則多使用鋼筋混凝土。

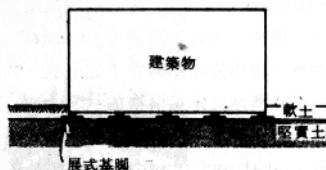


圖 1.1 使用展式基脚的建築物

若堅實土層接近地面，通用的辦法，是採用樁 (piles)、沉箱 (caissons)、或墩基 (piers) 等類的垂直物體，以傳遞結構物荷重達於土層深處。以上三個術語，沒有截然的差別。就一般而言，沉箱與墩基

的口徑較大，用開挖法施工。樁基則被打入地層內。房屋荷重藉着上述的樁、沉箱或墩基穿越軟土層以達地下之堅實土層。軟土層不能承受房屋荷重。

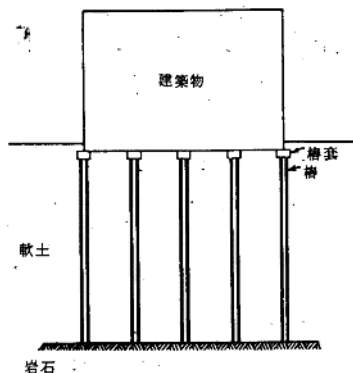


圖 1.2 使用樁基礎的建築物

成功的基礎工程師，不僅能決定基腳的大小、樁數、或樁徑。有時，還要設法改良土質，以求減低基礎費用。有些結構，例如鋼儲槽（steel storage tanks），可直接放在預先特別處理的土層上，而不利用穿入土內的構件。因此，基礎（foundation），除了指任何穿入土壤的載重構件外，也指位在結構物下的土壤。亦即指經過土木工程師的分析，使能有效而經濟地支承結構物的材料。而一般人們，也確實用基礎一詞以形容支承任何工程結構（例如房屋、壩、路堤、道路等）的材料。現代習慣用淺基（shallow foundation）這一術語來表示使用土壤直接支承上部結構的設施。而深基（deep foundation）則用於設有樁、沉箱、或墩基以傳遞荷重至深處堅實土層的情形。

設計任何基礎系統，其中心問題，皆在防止產生過量沉陷，以免危害結構物本身或其功能。允許沉陷量的大小，依下列幾個因素而定：結構物大小、型式、用途，基礎型式，產生沉陷的土層位置、性質，及結構物的地點。大體言之，危險的沉陷，不是沉陷總量（total settlement）的

大小，而是不均勻沉陷 (differential settlement)。不均勻沉陷，係指結構中兩部份，起了相對的垂直運動。

在美國及西歐的大都市裡，業主們皆不能容忍幾 mm 的沉陷。因沉陷太大，常引起裂痕，影響美觀。根據經驗，例如麻省理工學院校園內各建築物的圻工牆，只要沉陷量超過 125 mm，就會產生裂縫。

如若土質情況甚差，沉陷較大，業主也會容忍，以求節省造價。例如，巴西的聖多市 (Santos, Brazil) 濱水地區，15 層公寓，直接建在軟土層上。許多房屋，沉陷達 0.3 m 之多。裂縫明顯可見，但大多仍能繼續使用。

墨西哥城 (Mexico city) 的基礎情況十分惡劣，聞名已久。以藝術博物館為例，如圖 1.3 所示，建築物本身，沉入土中，已達 3.6 m 之多。參觀者以前拾階而登的地面，現在舊地重遊，却要拾階而降，因其沉陷過巨也。

除房屋建築外，大部份結構物都允許稍大的沉陷。柔性的結構物，例如儲槽及土堤，幾 m 的沉陷，也是常事。但精密追蹤雷達站與核子加速器的基礎，則不允許發生小如 0.2 mm 的沉陷。



圖 1.3 墨西哥城藝術博物館。房屋與街道發生 2 m 的不同沉陷，因而在右側需加設階級。在這一地區的沉陷量達 7 m 之鉅

美國麻省理工學院 (M.I.T.) 學生中心，如圖 1.4 所示。整座建築物設有整塊版構造的淺基。這整塊版構造稱為筏基 (mat)。該處土質，自地表向下算起是：4.5m 厚軟弱填土及有機質沉泥；6m 厚砂礫；22.5 m 厚軟粘土；最後是實土及岩盤。建築物空重 (稱為呆重 (dead load)) 285 MN。傢俱、人、書等活重 (live load) 為 45 MN。假使 330 MN 的總荷重，全砌置於地面上，由於下面的軟弱地層受到壓力，將產生 300mm 的沉陷。如此鉅大的沉陷量將使結構產生破壞。其解決之道，置房屋在開挖的地基中。挖除的土重為 258 MN，則房屋直接加於土層的淨重僅 72 MN。此種設計，預估沉陷量將為 50 至 75 mm，此值尚可容許。

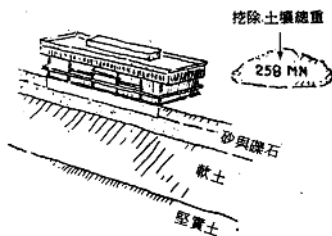


圖 1.4 置於淺筏基上的建築物

建築物重	= 285 MN
人、傢俱等重 (時間平均)	= 45 MN
	330 MN
挖除土壤重	= 258 MN
粘土層淨荷重	= 72 MN

用挖土以減輕淨荷重的技巧，稱為浮置法 (flotation)。其淨荷重，部份由挖除的土重來抵消的，稱為半浮置法 (partial flotation)；全部由挖除的土重來抵消的，稱為全浮置法 (full flotation)。使用全浮置法，結構在土層中，正如船浮在水中的原理相同。船體排除其等重的水，在水面下，凡等深之處，其應力皆相同而與水中是否有船毫無關係。圖 1.4 的房屋，其平均單位重為水的一半，土的單位重為水的 2 倍，故該房屋砌置深度，離地面僅需全高的 4 分之 1，即可成全浮置式。

此類問題，通常聘請土壤工程師，就筏基與深基 (如樁或沉箱等) 作

經濟比較。若決定採用筏基，則下列問題，必須逐一加以解答：

1. 建築物入土深度若干？
2. 開挖時，為防止土崩，是否需要圍以擋土牆？
3. 在開挖及基礎施工期間，是否需要降低地下水位？如若需要，採用何種排水（dewatering）方法？
4. 是否危害鄰近建築物？（我們將在以後幾章裡說明：在建築物下面降低水位將會引起嚴重的沉陷問題。而重要的問題是在如何降低水位與需時多久？）
5. 建築物完工後，沉陷量有多大？沉陷是否均勻？
6. 設計筏基時，應採用多大的應力及何種應力分佈？

樁基舉例

MIT 的材料館，如圖 1.5 所示，係採用深樁基礎材料館下層土質，與學生中心的相接近，僅少一薄層的砂礫。材料館全重 249MN（呆重 142 MN，活重 107 MN）。材料館呆重較小，因係採用較輕的建築材料，而活重較大。因經常裝置笨重的儀器。其採用樁基而不採用筏基的理由計有三點：

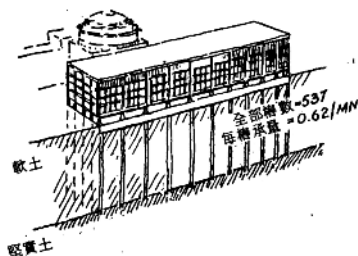


圖 1.5 置於深樁基上的建築物

建築物重	= 142 MN
工具、圖書、人等重	= 107 MN
最大總重	= 249 MN