

# 地下工程與 風險管理

黃南輝 編著



科技圖書



大地工程技師公會



# 地下工程與 風險管理

黃南輝 編著

大地  
新書



科技圖書



大地工程技師公會

地下工程與風險管理/ 黃南輝編著; -- 初版 --  
臺北市：科技圖書；〔桃園市〕：成陽發行，2011.03  
200面：19x26公分  
含參考書目；  
ISBN：978-957-655-483-4 (平裝)  
1. 大地工程 2. 風險管理 3. 捷運工程  
441 100003712

版權所有·翻印必究

## 地下工程與風險管理

編著者 / 黃南輝

出版 / 社團法人台灣省及台北市大地工程技師公會  
財團法人土木科技發展文教基金會

總編輯 / 台灣省大地工程技師公會理事長 陳江淮  
台北市大地工程技師公會理事長 沈銘閔

執行編輯 / 大地工程技師公會學術暨國際關係委員會  
省主任委員 詹松儒  
市主任委員 陳建璋

編輯小組 / 大地工程技師公會學術暨國際關係委員會  
省委員 何樹根、林士誠、陳瑞禾、鄭清江（依姓名筆劃排列）  
市委員 林永祥、楊智堯、鄭豫謹、蘇鼎鈞（依姓名筆劃排列）

校稿 / 王劍虹、黃立煌（依姓名筆劃排列）

總經銷 / 科技圖書股份有限公司  
地址：台北市忠孝西路一段 50 號 17 樓之 35 室  
電話：(02)2370-7080 傳真：(02)2370-6160  
網址：<http://www.techbook.com.tw/> 電子郵件：techbook@ms18.hinet.net  
郵撥帳號：0015697-3 戶名：科技圖書股份有限公司

發行所 / 成陽出版股份有限公司  
電話：(03)271-7085 傳真：(03)355-6521  
地址：桃園市春日路 1492 號 4 樓之 8

印刷 / 海王印刷事業股份有限公司

初版 / 2011 年 3 月

ISBN / 978-957-655-483-4

定價 / 新台幣 400 元

本書如有破損、裝訂錯誤，請寄回調換





## 序

初認識黃南輝博士可以追溯到 1979 年，當時黃博士甫從美國到新加坡接掌日本基礎地盤株式會社新加坡分社，之後黃博士擔任新加坡地鐵公司的大地工程專業顧問，因此在工作上 and 黃博士有更密切的接觸。1987 年台北市政府成立捷運工程局推動捷運工程，而亞新公司又有幸受捷運工程局委託擔任大地工程專業顧問，從規劃、設計到施工階段提供大地專業的諮詢服務，由於黃博士在新加坡地鐵的豐富經驗正是亞新公司所需，所以當時積極延攬黃博士參與台北捷運工作，也蒙黃博士首肯，於是開始了長達廿年的愉快合作。在黃博士的領導之下，整個專案團隊的努力成果備受業主的肯定，公司同仁們也受益非淺。黃博士在工作之餘，發表有關地下工程之中英文著作多達 140 篇，對工程技術之進步貢獻良多，現在黃博士願意將其畢生之智慧結晶整理成書，讓工程界有更多人可以受惠，正是我等所樂見的。

在「地下工程與風險管理」一書中，累積了黃博士在新加坡地鐵及台北捷運中長達卅年施工安全管理的實務經驗，內容包括地質與工程、深開挖、隧道工程、地下水、建物保護與地盤改良及風險管理等六大篇。顧名思義，地下工程是大地工程師最能發揮所長的領域，而無論就規模、就困難度、就挑戰而言，捷運工程不僅是地下工程之最，更是所有土工風險的總合。在過去數十年間，世界各地陸續發生了相當多令人觸目驚心的土工災變，黃博士的大作正可說是一貼良藥，溫補健身，句句精髓。此外，書中黃博士提出頗多個人累積多年實務經驗後的精闢創見，如第二篇中提出的側向位移路徑觀念，對目前業界熟悉的連續壁分析及設計另闢蹊徑，見解獨到，意義十分重大。

整體而言，本書結合了今日有關地下工程的最新觀念和國內重大工程如捷運、京華城等的實務經驗，蒐集的經驗數據是目前工程界，甚至是世界上其他相關書籍難以比擬的。黃博士經驗豐富，文筆流暢，將嚴謹的實務案例，用非常簡潔的文字生動地表達，可讀性高，對從事地下工程的大地工程師，實為不可多得的好書，值得向同好推薦。

亞新工程顧問公司集團

董事長 莫若楫

莫若楫

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 序.....                      | I  |
| <b>第一章 台北盆地沖積層之工程特性 / 1</b> |    |
| 1.1 地質分區.....               | 2  |
| 1.2 松山層之工程特性.....           | 3  |
| 1.3 景美層之工程特性.....           | 9  |
| 1.4 地下水.....                | 11 |
| 1.5 流木.....                 | 12 |
| 1.6 沼氣.....                 | 15 |
| 參考文獻.....                   | 17 |
| <b>第二章 深開挖 / 19</b>         |    |
| 2.1 台北盆地深開挖案例.....          | 19 |
| 2.2 連續壁位移修正.....            | 22 |
| 2.3 連續壁位移路徑.....            | 28 |
| 2.4 參考包絡線.....              | 32 |
| 2.5 連續壁位移之數值分析.....         | 36 |
| 2.6 逆打工法對連續壁位移之影響.....      | 44 |
| 2.7 扶壁對連續壁位移的影響.....        | 50 |
| 2.8 地中壁對連續壁位移的影響.....       | 52 |
| 參考文獻.....                   | 57 |
| <b>第三章 隧道工程 / 59</b>        |    |
| 3.1 台北捷運初期路網潛盾施工.....       | 59 |
| 3.2 隧道上方地表沉陷.....           | 62 |
| 3.3 主沉陷與次沉陷.....            | 69 |
| 3.4 台北盆地之沉陷槽.....           | 75 |
| 3.5 松山機場下方捷運隧道.....         | 78 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 3.6 松山機場下方車行地下道 .....  | 95  |
| 3.7 基隆路地下道下方捷運隧道 ..... | 103 |
| 參考文獻 .....             | 113 |

#### 第四章 地下水與祛水 / 115

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 4.1 水井水力學 .....          | 115 |
| 4.2 台北捷運初期路網祛水案例 .....   | 119 |
| 4.3 景美層水理參數及抽降水之影響 ..... | 126 |
| 4.4 中和線通風豎井封底 .....      | 132 |
| 4.5 新加坡地鐵濱海灣站水中開挖 .....  | 136 |
| 4.6 墨西哥市污水下水道浮式構築 .....  | 137 |
| 參考文獻 .....               | 140 |
| 定義 .....                 | 141 |

#### 第五章 建物保護與地盤改良 / 143

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 5.1 明挖工程上之應用 .....     | 143 |
| 5.2 潛盾隧道工程上之應用 .....   | 147 |
| 5.3 新奧工法隧道工程上之應用 ..... | 151 |
| 5.4 建物保護之應用 .....      | 152 |
| 5.5 其他應用 .....         | 155 |
| 參考文獻 .....             | 157 |

#### 第六章 風險管理 / 159

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 6.1 近年亞太地區地下工程重大事故 ..... | 160 |
| 6.2 災變主因探討 .....         | 166 |
| 6.3 工程事故後果評估 .....       | 170 |
| 6.4 風險管理概念 .....         | 173 |
| 6.5 施工安全管理 .....         | 180 |
| 6.6 以保險手段轉移風險 .....      | 182 |
| 6.7 地下工程兩側禁建與限建 .....    | 182 |
| 參考文獻 .....               | 188 |



# 第一章 台北盆地沖積層之工程特性

作者自1989年回國後，主要工作與捷運工程密切相關，尤其擔任亞新公司捷運專案經理一職，忝為台北捷運工程局的大地工程專業顧問，長達9年。其間有幸參與初期路網中之新店、板橋、中和及南港線等四線之興建，自細部設計之審查至地下結構之構築完成，受益匪淺。本書所引述之案例，絕大多數位於台北盆地，所以在此對台北盆地之地質略作介紹，以方便讀者對書中所舉案例之土壤特性有通盤之瞭解。

自從1970年代起，由於經濟的蓬勃發展，高樓如雨後春筍般出現在台北市區，地下空間也被充分應用，地下室越挖越深，政府也積極推動如鐵路地下化、衛生下水道等大型地下工程，為大地工程帶來發展契機。台北盆地的地質也被廣泛研究、探討，但在早年所有的研究不免侷限於市中心區，在1980年代才延伸至東區。1986年台北市政府捷運工程籌備處成立，開始規劃捷運系統，對台北盆地的地質及土壤的工程性質才有全面性的研究。在1990年代，隨著捷運工程的快速推動，鑽探資料急劇增加。捷運初期路網(淡水線、木柵線、新店線、南港線、板橋線、中和線)涵蓋整個台北盆地，南北及東西地質剖面得以建立。捷運沿線的地層剖面如圖1-1至1-4所示。近年來，中央地質調查所、台北市政府、許多公立機關以及私立機構都建有地質資料庫，將鑽孔資料保存在地理資訊系統 (GIS: Geographic

Information System)建立之資料庫中，便於查詢及維護，非常有助於未來的研究發展。

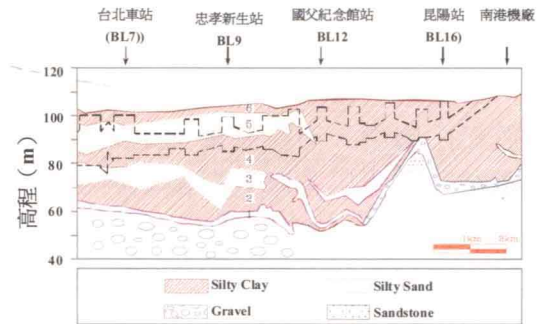


圖 1-1 台北捷運南港線沿線土層剖面圖

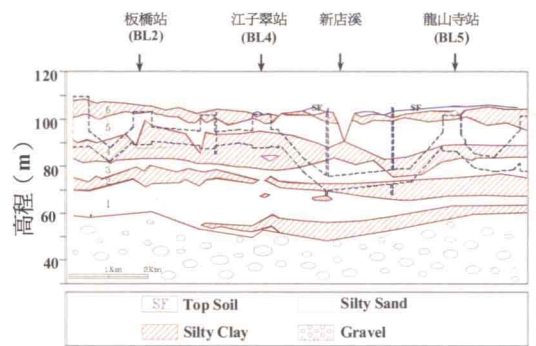


圖 1-2 台北捷運板橋線沿線土層剖面圖

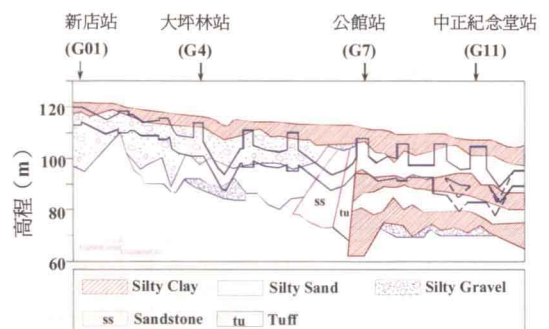


圖 1-3 台北捷運新店線沿線土層剖面圖

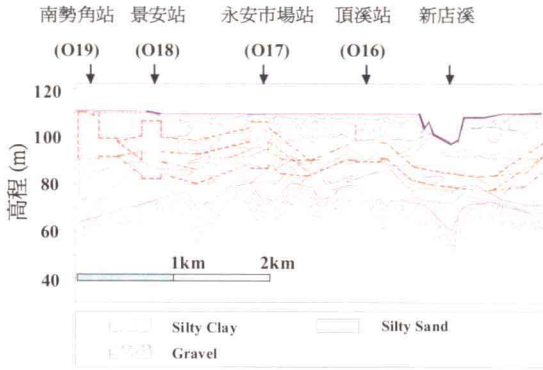


圖 1-4 台北捷運中和線沿線土層剖面圖

由於台北盆地的地下空間應用大多位於松山層中，而深基礎則是以景美層為承載層，所以本章之討論限於松山及景美兩層。松山層的沉積受到海平面升降與河道變遷的影響，層次分明。洪如江(1966)首先將松山層分成六次層，由下而上第一、三、五層為砂性土層，第二、四、六層為粘性土層。這六個次層在盆地中心區明顯可辨。圖1-5表示在盆地中心善導寺附近所進行的水壓錐貫入試驗(piezocene penetration test)的試驗結果，各層所得之結果明顯不同，尤其是水壓計的反應尤為清晰，足證水壓錐實為分別黏土與砂土之很好的工具。

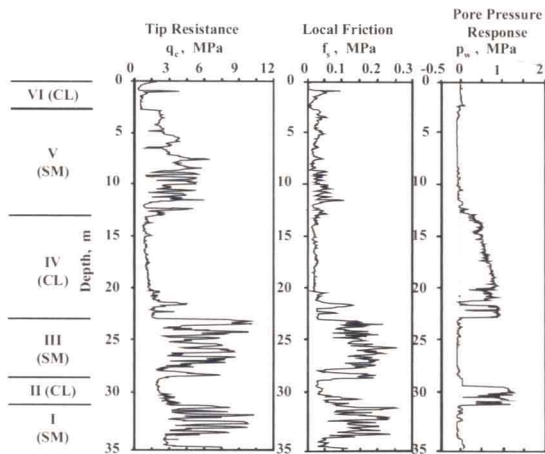
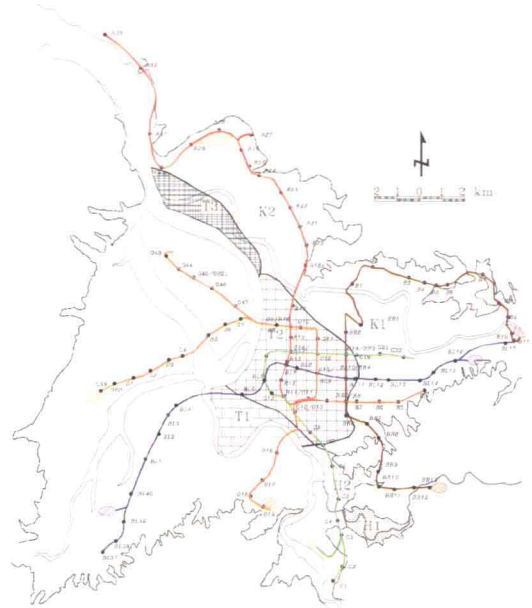


圖 1-5 台北盆地 T2 區水壓錐試驗結果

## 1.1 地質分區

多位專家、學者曾依松山層六個次層的分布及工程性質將台北盆地地層進行分區，如早期郭俊良(1975)、吳偉特(1979)，及其後Cheng(1987)、Huang, et al. (1987)及亞新工程顧問公司(1987)等。吳偉特(1979)所建議之工程地質分區圖可視為第一代工程地質分區。亞新工程顧問公司(1987)將台北市地區依河流流域及地層性質差異，分成七個分區，供工程初步規劃階段之參考，是為第二代(見圖1-6)。



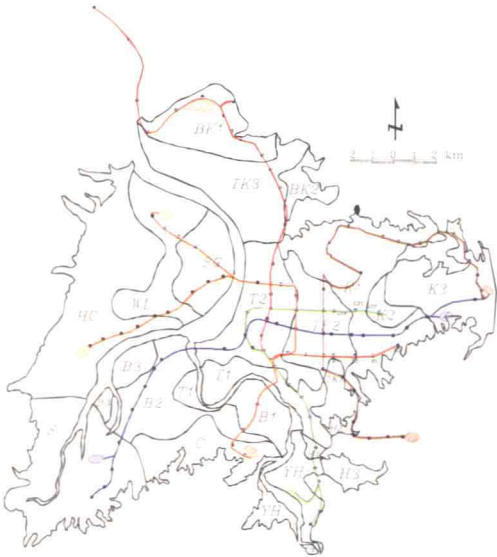
資料來源：亞新工程顧問公司，1987

圖 1-6 第二代台北盆地地質分區圖

早期的研究侷限在淡水河及新店溪東岸之台北市區內。近年來淡水河西岸之鑽探資料急速增加，因而許多專家學者先後進行淡水河西岸的地層分區研究，如劉震隆(1994)、李咸亨(1996)、洪如江等(1999)。李咸亨(1996)利用大地工



程資料庫系統彙整之歷年鑽探資料，考量松山層第三、五次層之存在性及第五次層礫石含量關係，將台北盆地分成22個分區(見圖1-7)，是為第三代。



(資料來源：李咸亨，1996)

圖 1-7 第三代台北盆地地質分區圖

地質分區首先考量沖積物的源頭，也就是台北盆地的主要水系-淡水河及其三大支流：基隆河、新店溪及大漢溪(亞新工程顧問公司，1987)。淡水河區(T區)乃為典型的松山六次層區，依松一層之厚度分為T1及T2兩區。淡水河/基隆河(TK區)以松一層及松三層之尖滅程度區分為TK1、TK2及TK3三區。基隆河區(K區)分為三區，K1區之松三及松五層皆消失，K2區之松一層及松三層消失，而在K3區只有松三層消失。北投關渡區(BK區)之松三層完全消失，又以松五層是否消失而分為BK1(松五層消失)及BK2(松五層存在)兩區。新店溪區(H區)之松二層皆尖滅，但因其他層之尖滅情形分為3區。為方便讀者，以上分區原則整理如表1-1

所示。至於其他區可與上述各區相比對，如YH區及S區之性質與H1區之性質相近，B2及SC區之性質與HC區之性質相近，B3區之性質與WL區之性質相近，B1區之性質與T1區之性質相近，而C區之性質與K1區之性質相近(李咸亨，1996)。

早期捷運工程是以亞新工程顧問公司(1987)之分區為主要依據，1996年後則以李咸亨(1996)之分區為主要依據。本書亦以後者為主。

表 1-1 台北盆地地質分區原則

| 地質分區 | 松一層       | 松二層 | 松三層          | 松四層 | 松五層 |
|------|-----------|-----|--------------|-----|-----|
| T1   | 出現頻率較T2區小 |     |              |     |     |
| T2   |           |     |              |     |     |
| K1   |           |     | 消失           |     | 消失  |
| K2   | 消失        |     | 消失           |     |     |
| K3   |           |     | 消失           |     |     |
| TK1  | 出現頻率<20%  |     | 30%<出現頻率<40% |     | 含礫石 |
| TK2  | 出現頻率≈50%  |     | 30%<出現頻率<40% |     |     |
| TK3  | 出現頻率<20%  |     | 30%<出現頻率<40% |     |     |
| BK1  |           |     | 尖滅           |     | 消失  |
| BK2  |           |     | 尖滅           |     |     |
| H1   |           | 尖滅  |              | 消失  | 含礫石 |
| H2   |           | 尖滅  | 尖滅           | 尖滅  |     |
| H3   | 消失        | 尖滅  | 尖滅           |     |     |

(參考李咸亨，1996)

## 1.2 松山層之工程特性

由於捷運的地下結構物以及高樓地下室絕大多數位在松山層中，松山層的工程特性一直是大地工程相關課題研究

的重點。松山層由鬆軟之泥砂互層所組成，幾乎覆蓋了整個台北盆地，而以五股、蘆洲一帶為最厚。如圖1-1至圖1-4所示，松山層的底部深度平均在地表下50~60m間。亞新工程顧問公司(1987)及李咸亨等(1996)依松山層不同次層之粒徑分布分析，研判松山層之沉積環境應主要受進入台北盆地之三條河流沖積扇，在不同時期的消長所控制。松山層沉積早期，由大漢溪主導，在盆地西南側沉積大量砂礫，後續新店溪加入，漸為砂礫沉積主導，而基隆河則在盆地北部及東北部沉積大量黏土。

有關松山層土壤工程特性的文獻相當地豐富。早期文獻如為吳偉特(1979)、洪如江(1966)及Woo & Moh (1990)。Chin, et al. (2007)一書彙整K1、K2、T2、TK2以及H2區的工程特性，資料尤為豐富。由於資料甚多，以下僅能擇要介紹。

### 1.2.1 砂土次層工程特性

松一、松三、松五層為砂土層，其組成因地區而不同。如表1-2所示，各層砂土含量皆超過50%，在H2區甚至有大量的礫石。由於在受力後的良好排水行為，超額孔隙水壓快速消散，砂土層的工程特性相對單純，其抗剪強度可以簡單地以有效應力摩擦角表示之。在實務上是以標準貫入試驗(SPT: standard penetration test)為主要工具，將所得結果(即所謂N值)以經驗公式換算可得。各區所得之有效摩擦角如表1-3所示。

至於砂土層的楊式模數，一般是由回饋分析而得。如眾所周知，回饋分析的結果會因分析的主題(如連續壁變形、地表沉陷)，所採的應力/應變模式，以及

所使用的工具(如電腦分析程式)而不同，並無定值。作者最近採Mohr-Coulomb模式以PLAXIS分析了幾個深開挖連續壁位移(含台北及高雄地區)，下式所得結果尚稱滿意。

$$E = 2 N \text{ (MPa)} \quad \text{式(1-1)}$$

表 1-2 松山層中砂土次層基本性質

| 土層  | 地質分區 | $\gamma_d$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | W<br>(%) | $G_s$ | 粒徑分布(%) |    |    |    |
|-----|------|------------------------------------|----------|-------|---------|----|----|----|
|     |      |                                    |          |       | 礫石      | 砂  | 粉土 | 黏土 |
| 松五層 | K1   | 17                                 | 20.1     | 2.68  | 2       | 73 | 18 | 6  |
|     | K2   | 14.1                               | 33.1     | 2.67  | 1       | 76 | 19 | 5  |
|     | T1   | 18.5                               | 18.7     | 2.71  | 11      | 63 | 16 | 5  |
|     | T2   | 15.4                               | 26.3     | 2.68  | 1       | 75 | 19 | 4  |
|     | H2   | 19.1                               | 13.3     | 2.69  | 22      | 52 | 20 | 5  |
| 松三層 | K1   | 16.1                               | 23.5     | 2.69  | 0       | 54 | 36 | 11 |
|     | K2   | 15.6                               | 26.4     | 2.69  | 3       | 60 | 26 | 10 |
|     | T1   | 16.6                               | 21.7     | 2.71  | 1       | 54 | 18 | 6  |
|     | T2   | 16.1                               | 23.9     | 2.69  | 0       | 60 | 34 | 7  |
|     | H2   | 16.9                               | 20.9     | 2.69  | 2       | 68 | 25 | 7  |
| 松一層 | K1   | 16.8                               | 20.9     | 2.68  | 0       | 59 | 32 | 9  |
|     | K2   | 16.6                               | 21.2     | 2.7   | 4       | 68 | 18 | 9  |
|     | T1   | -                                  | -        | -     | -       | -  | -  | -  |
|     | T2   | 17.                                | 20.3     | 2.69  | 1       | 62 | 29 | 7  |
|     | H2   | 17.2                               | 21.3     | 2.7   | 0       | 80 | 18 | 2  |

(資料來源：亞新工程顧問公司(1987))

表 1-3 松山層中砂土次層工程性質

| 地質分區 | 土層  | N值<br>(blows/300mm) | 有效摩擦角<br>(度) |
|------|-----|---------------------|--------------|
| K1區  | 松五層 | 12 ± 7              | 32.3 ± 1.8   |
|      | 松三層 | 16 ± 7              | 32.4 ± 1.1   |
|      | 松一層 | 31 ± 14             |              |
| K2區  | 松五層 | 5 ± 4               | 32.4 ± 1.2   |
|      | 松三層 | 20 ± 12             | 35.3 ± 3.6   |
|      | 松一層 | 19 ± 5              |              |
| T2區  | 松五層 | 10 ± 5              | 32.5 ± 1.8   |
|      | 松三層 | 21 ± 4              | 33.3 ± 1.8   |
|      | 松一層 | 31 ± 9              | 34.2 ± 1.0   |

(資料來源：亞新工程顧問公司(1987))



當然不確定因素甚多，所以上式不見得能一體適用。尤其所謂標準貫入試驗，其實一點也不標準，其結果僅能供參考。Seed, et al. (1985)指出標準貫入試驗的結果會受落錘能量之影響，必須修正才有一致性。作者廿餘年前在新加坡執業時即有經驗，不同廠商所得N值最多可以差到三倍。如此差異，很難期望回饋分析能得到一致的結果。學界及業界也有研究以一致性較高的荷蘭錐試驗探討砂土層之特性，但至今並未成主流。作者個人的經驗顯示，國外以荷蘭錐試驗結果所建立的經驗公式以及關係圖並不全然適用於松山層的土壤。若要推廣荷蘭錐的應用，必須建立本土的經驗公式。至於式(1-1)之應用，將在本書第二章作進一步討論。

### 1.2.2 黏土次層工程特性

如表1-4所示，由於粉土含量較高，所謂台北黏土(Taipei Clay)其實應稱為台北粉土(Taipei Silt) 較為適宜。但因為其行為接近黏土，所以稱之為黏土亦無不可。由於黏土的不排水(其實是部分排水)行為相當複雜，與砂土層相較，與黏土層相關的研究，無論在質或在量的方面，皆遠為超過。

洪如江(1966)研究指出，台北盆地的黏性土壤礦物組成以依利土(Illite)及綠泥石(chlorite)為主。秦中天等(1997)以x-ray光譜反應測試K1區黏土(深度在18~22m間)，結果如圖1-8所示。顯示該地黏土是由78% 依利土 (Illite)、20% 高嶺土 (Kaolinite) 和少量綠泥石 (Chlorite) 所組成。

圖1-9表示所取得之黏土由電子顯微

鏡所攝影像，顯示垂直向拍攝(水平面)，土壤顆粒大致為片狀排列，層層疊置。水平向拍攝(垂直面)，土壤顆粒排列方式較不規則，大致呈角對角或角對面之結合。土壤的成分及微結構與其料源有關，對其工程特性亦有影響，學界不乏相關研究，但這已逾越本書範圍。

表 1-4 松山層中黏土次層基本性質

| 土層  | 地質分區 | $\gamma_d$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | W<br>(%) | $G_s$ | LL<br>% | PL<br>% | 粒徑分布 (%) |    |    |
|-----|------|------------------------------------|----------|-------|---------|---------|----------|----|----|
|     |      |                                    |          |       |         |         | 砂        | 粉土 | 黏土 |
| 松六層 | K1   | 14.3                               | 32.1     | 2.71  | 34.1    | 11.1    | 11       | 61 | 29 |
|     | K2   | 12.7                               | 40.6     | 2.73  | 38.9    | 15.6    | 3        | 53 | 44 |
|     | T1   | 16.8                               | 26.6     | 2.68  | 33.3    | 11.2    | 34       | 31 | 26 |
|     | T2   | 14.5                               | 31.2     | 2.72  | 35.8    | 12.9    | 10       | 58 | 32 |
|     | H2   | 13.9                               | 33       | 2.71  | 35      | 13.8    | 8        | 57 | 35 |
| 松四層 | K1   | 13.7                               | 35.1     | 2.72  | 35.2    | 12.9    | 4        | 61 | 35 |
|     | K2   | 12.8                               | 40.5     | 2.73  | 38.8    | 15.5    | 3        | 53 | 45 |
|     | T1   | 17.                                | 30.6     | 2.72  | 26.9    | 8.3     | 22       | 43 | 26 |
|     | T2   | 14.3                               | 32.1     | 2.72  | 34.3    | 12      | 8        | 61 | 31 |
|     | H2   | 14.6                               | 31       | 2.73  | 31.2    | 10.1    | 10       | 65 | 25 |
| 松二層 | K1   | 15.2                               | 28.3     | 2.71  | 33      | 12      | 12       | 54 | 35 |
|     | K2   | 14.3                               | 31.2     | 2.7   | 33.7    | 12      | 9        | 58 | 33 |
|     | T1   | 15.1                               | 28.5     | 2.73  | 31.2    | 9.4     | -        | -  | -  |
|     | T2   | 15.5                               | 27.2     | 2.72  | 30.3    | 9.2     | 9        | 67 | 25 |
|     | H2   | 14.4                               | 30.8     | 2.7   | 33.2    | 9.5     | 16       | 66 | 18 |

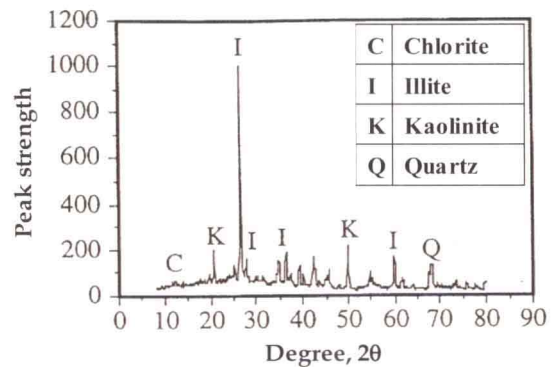
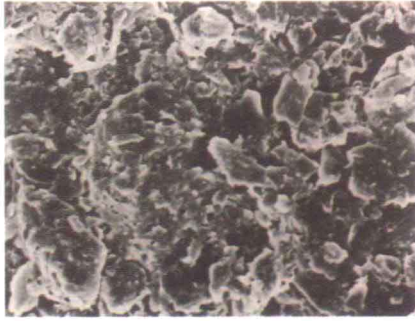


圖 1-8 松山地區黏土 x 光繞射試驗結果 (秦中天等, 1997)



(a)垂直拍攝(水平面)



(b)水平拍攝(垂直面)

圖 1-9 電子顯微鏡下的台北黏土 (秦中天等, 1997)

最為設計者及施工者所關注的是土壤的抗剪強度及彈性模數。一般而言，各次層黏土的含水量都接近液性限度，在K2區松六層及松四層的含水量甚至超過液性限度。如此軟弱黏土在受到擾動時很容易失去其強度。

如圖1-10所示，不同試驗所得抗剪強度差異甚大。在實務上，一般皆採用所謂UU試驗，也就是不壓密不排水試驗。但UU試驗又有多種試驗方法。試體是否事先予以飽和，試驗結果並不相同。以圖1-10為例，事先飽和的試體(SUU)其抗剪強度較未飽和(UUU)者為低，折減率約為30%至50%。反之，如果試體先經過壓密，則其抗剪強度會提高30%至50%。Chin, et al. (1994) 根據固定速率壓密(CRSC)試驗，不同OCR下之三軸Ko壓密不排水壓縮及伸張 (CKoUC、CKoUE)試

驗、及Ko壓密不排水單剪 (CKoUDSS) 試驗，定出台北盆地松四層凝聚性土壤之降伏面 (yield envelope) 如圖1-11所示。

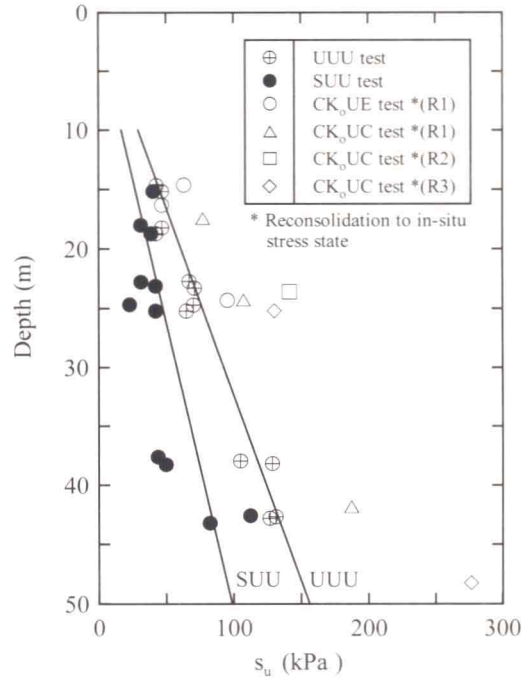


圖 1-10 不同試驗所得剪力強度 (Chin, et al., 1994)

秦中天等 (1989) 根據 SHANSEP (Stress History and Normalized Soil Engineering Properties: Ladd et al., 1974) 觀念針對松山層凝聚性土壤的不排水剪力強度，研究台北盆地凝聚性土壤的正規化行為(normalized behavior)，以及不排水剪力強度與應力歷史之關係，並且以 SHANSEP 關係式：

$$\left[ \frac{s_u}{\sigma'_c} \right]_{OC} = \left[ \frac{s_u}{\sigma'_c} \right]_{NC} \cdot OCR^m \quad \text{式(1-2)}$$

求得式中之 m 值約為0.80±0.08。該研究同時發現台北盆地凝聚性土壤不排水剪力強度應力比 ( $s_u/\sigma'_c$ ) 隨過壓密比 (OCR) 與塑性指數 ( $I_p$ ) 值的變化情形，如圖1-12所示。



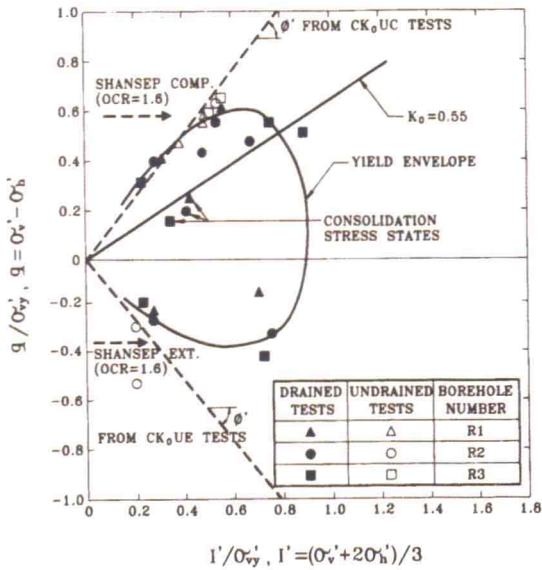


圖 1-11 松四層黏土降伏包絡線 (Chin, et al., 1994)

一般教科書將土壤以粒徑分布分為砂土及黏土兩大類，前者被假設為排水材料，後者為不排水材料。如此作法實在過於簡化土壤行為。在分壤分類表中，細料含量在50%以下的土壤全被歸類為砂土，但經驗顯示，細料含量在30%以上的土壤，其行為即接近不排水行為。材料之是否排水除取決於其透水度(受粒徑分布之影響)外，受力持續期間以及邊界條界也很重要。超額孔隙水壓會隨時間而消散，所以在極度緩慢的加載情形下，黏土亦為排水材料。而超額孔隙水壓的速率也因排水路徑之長短而定。所以一個存在於砂層中的黏土薄層，其超額孔隙水壓也會消散，不應以不排水材料視之。

除了排水與否的困擾外，土壤的抗剪強度也因加載模式不同而不同。以土壤力學中最为單純的土堤加載為例，如圖1-13所示，其破壞面可以以圓弧表示之。土堤下方的土體(位置A)受到垂直向

增壓，其抗剪強度應以壓縮試驗求得，坡腳下方的土體(位置B)受到單純剪力，其抗剪強度宜以單剪試驗求得，而圓弧末端的土體(位置C)因水平向增壓而在垂直向伸張，應以伸張試驗求其抗剪強度。所以抗剪強度因受力模式不同而不同，抗剪強度的選用，應以破壞面上所有土體的平均強度為計算之基礎。

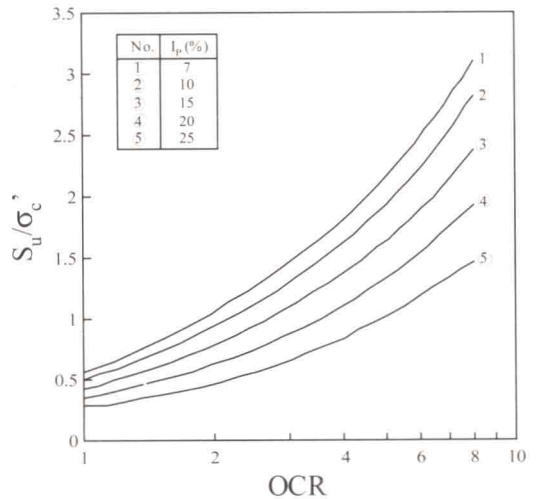
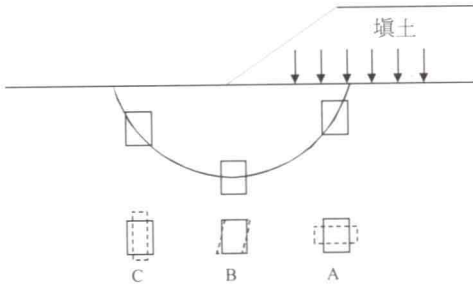


圖 1-12 CIUC 試驗所得不排水剪力強度與過壓密比之關係(Chin et al. 1989)

圖1-13所舉之例相對單純，破壞模式、破壞面以及分析模式都相當明確。地下工程的土壤受力行為較上例更為複雜。以深開挖而言，如圖1-14所示，連續壁外的土體(位置D)由於水平向土壓的減少，在垂直向收縮，導致地表沉陷，而開挖區內的土體(位置E)由於垂直向壓力的減輕而伸張，導致開挖面隆起。所以連續壁內、外土體的受力模式不同、抗剪強度也不相同。隧道開挖時的土壤行為又是另成一格。掘進時有拱效應(arching effect)，背填灌漿時又有孔擴張(cavity expansion)效應，還要再加上三維的考量。如何決定適用的土壤抗剪強度，並無標準答案。



伸張試驗 單剪試驗 壓縮試驗

圖 1-13 土堤加載土體受力模式

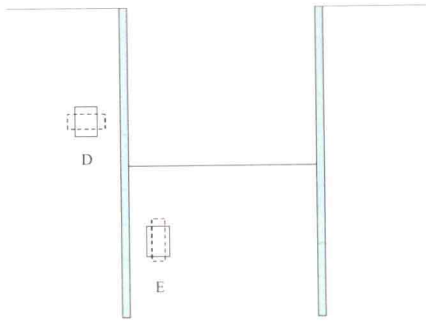


圖 1-14 深開挖土體受力情形

大地工程所用的數值分析工具，如有限元素法或有限差分法等，都源自結構工程。在使用這些工具時都需要彈性模數及柏松比這兩個參數。但如圖1-15所示，土壤是非彈性體 (non-elastic material)，其正割模數值(secant modulus) 並非定值，而隨應變而變。模擬土壤應力應變關係的數學模式相當多，最簡單而且最實用的莫過於圖1-16及圖1-17所示的elastic-perfect-plastic 模式。把一個複雜的關係式以兩個參數， $q_r$  及  $E_{50}$ ，表示之。在一般情形下，使用此模式所得的結果尚稱合理。以圖1-15所示試驗結果為例， $\epsilon_{50}$ 約為1%。由圖1-18即可求得  $E_{50}$ 。

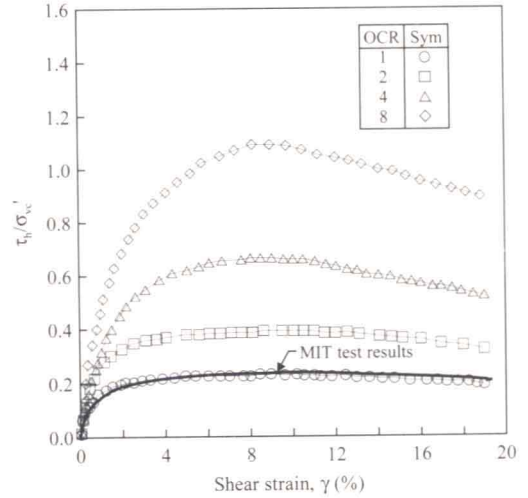


圖 1-15 直剪試驗土壤的實際應力應變行為 (劉泉枝, 1999)

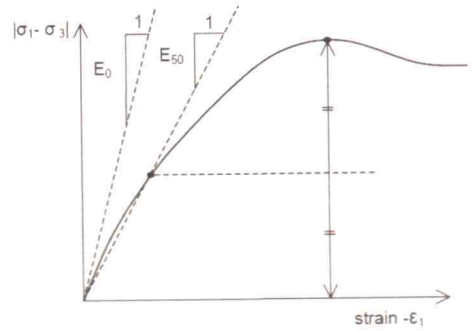


圖 1-16 代表性土壤應力應變行為

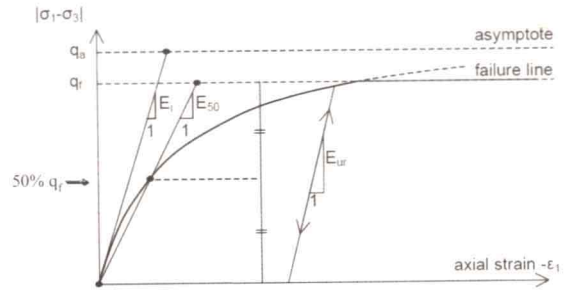


圖 1-17 彈塑性土壤應力應變行為



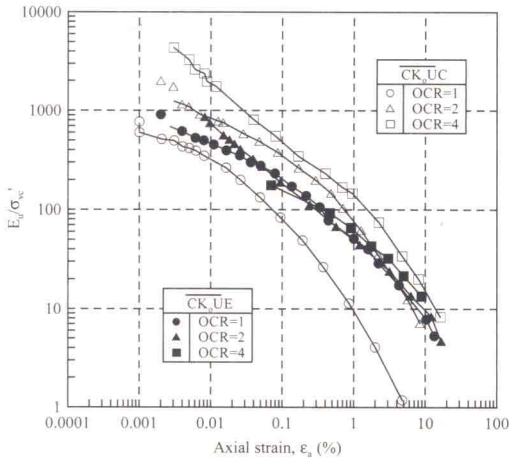


圖 1-18 正規化後的不排水彈性模數 (秦中天等, 1997)

但實務上的作法卻非如此，現場土壤的行為與試驗室所得畢竟並不相同。在設計或回饋分析時，一般假設土壤的彈性模數與其抗剪強度成正比，即

$$E = c Su \quad \text{式(1-3)}$$

常數c可由回饋分析求得。表1-5表示以不同的程式比對四個在新加坡濱海地區深開挖最終連續壁位移所得新加坡海泥 (Singapore marine clay)的E/S<sub>u</sub> 比值 (Wong, 2005)。該表顯示，不同的案例以不同的程式分析所得的結果並不相同。這除了是因為土壤的不確定性外，分析程式內建的運算模式不同也是原因。而現場連續壁位移受到許多環境及施工因素的影響，這些因素在回饋分析時並未納入考慮，分析結果自然不同。

至於台北黏土之E/S<sub>u</sub>比值，文獻中由500至2000的建議都有。作者採E/S<sub>u</sub> = 500以PLAXIS分析K1區的深開挖，結果尚稱合理。但因為案例不多，此關係式是否廣泛適用尚待驗證。對於此點，在第二章將會作進一步討論。

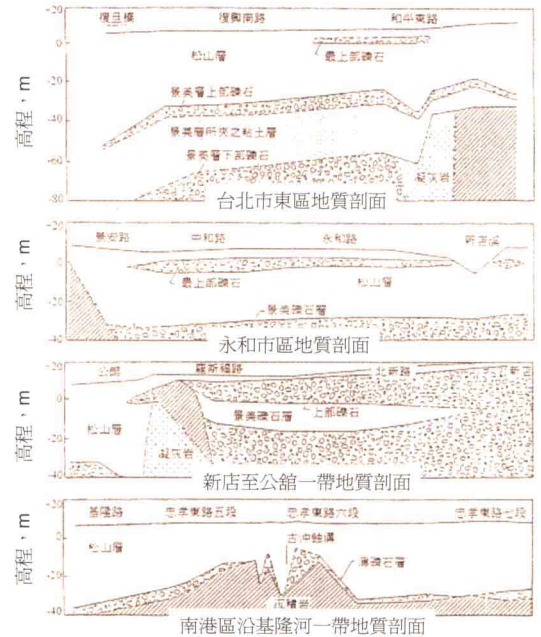
表 1-5 新加坡海泥回饋分析結果

| Program<br>Material<br>Model | E/S <sub>u</sub> |                   |                      |                     |
|------------------------------|------------------|-------------------|----------------------|---------------------|
|                              | MOE<br>Building  | Rochor<br>Complex | Syde Aiwi<br>Project | Lavender<br>Station |
| Wallap<br>Mohr-Coulomb       | 250              | 250               | 300                  | 300                 |
| Sage Crisp<br>Mohr-Coulomb   | 100              | 150               | 300                  | 300                 |
| Sage Crisp<br>Hyperbolic     | 300              | 300               | 300                  | 300                 |
| EXCAV97<br>Hyperbolic        | 200              | 200               | 200                  | 200                 |

(Wong, 2005)

### 1.2.3 礫石層特性

如表1-2所示，松山層中亦有礫石存在，尤以新店地區最為明顯(參考圖1-3)。圖1-19表示幾個有代表性的地區礫石分布情形(Woo and Moh, 1990；傅怡仁等, 1990；胡逸舟等, 1996)。由於這些礫石粒徑不大，而且其厚度有限，據作者所知，並未對工程造成任何困擾。



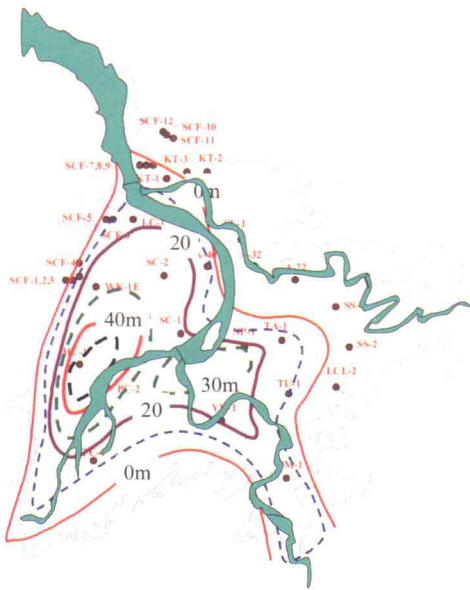
(資料來源：Woo and Moh, 1990)

圖 1-19 松山層內礫石層分布示意圖

### 1.3 景美層之工程特性

台北陷落成盆地後，新店溪仍自上

游搬運礫石及泥砂，在盆地南側斷層崖下沉積扇狀礫石層，不斷向下游堆積，掩蓋在五股層之上，稱之為景美層。景美層礫石由景美地區向西北方成扇形分布於台北盆地大部份地區，其分布大致如圖1-20所示(鄧屬予等，2004)。在盆地東緣及東北緣，景美層礫石則有尖滅現象。距離景美地區愈遠，景美層之頂部愈深，最深處為五股、蘆洲一帶，在海平面下120m以下。



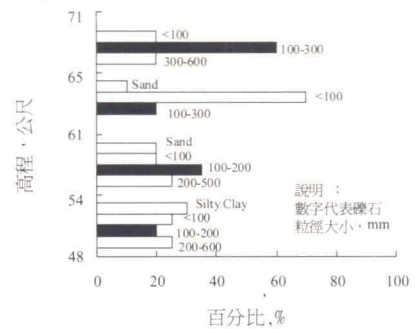
(參考資料：鄧屬予等，2004)

圖 1-20 景美層厚度示意圖

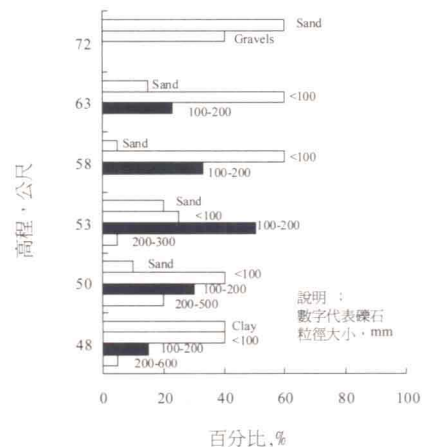
表 1-6 祛水作業回饋分析結果

|                  | 施工標    | 位置            | 最大<br>出水量<br>cmh | 導水係數<br>(T)<br>m <sup>2</sup> /sec | 儲水係數<br>(S)<br>x 10 <sup>-5</sup> |
|------------------|--------|---------------|------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 板橋線              | CP261  | 通風豎井 B        | 3600             | 0.12~0.18                          | 100~400                           |
| 板橋線              | CP262  | 通風豎井 A        | 4170             | 0.12~0.18                          | 100~400                           |
| 淡水線              | CT201F | 台北車站          | 2450             | 0.12~0.18                          | 100~400                           |
| 新莊線              | CK570C | 道岔段           | 2700             | 0.042                              | 100                               |
| 新莊線              | CK570G | 大橋國小          |                  | 0.058~<br>0.065                    | 5~20                              |
| 機場聯<br>外捷運<br>系統 | CA450B | 交九基地<br>C1/D1 | 尚未進<br>行         |                                    |                                   |

至於景美層的粒徑分布，資料十分有限。中和線通風豎井(位於T1區，屬新店線CH221施工標)連續壁施工時，曾自槽溝取樣，分析景美層的粒徑如圖1-21所示(楊國榮等，1997；2009)。但因在取樣時細料流失，所以粒徑分布並不十分正確，只能說最大粒徑可達600mm，但亦無法保證沒有更大卵石。方永壽(2009)報導，新店線CH222至CH224標(公館站至大坪林站)潛盾工程試坑開挖結果發現卵礫石最大粒徑為500mm，土城線CD269標(海山站至土城站)隧道段卵礫石粒徑一般為100mm~300mm，潛盾隧道施工過程中發現自螺運機排出的卵礫石粒徑達360mm，但附近車站深開挖工程發現少數粒徑達1000mm。這些卵礫石是否屬景美層有待查證。



單元5



單元13

(資料來源：楊國榮等，1997; 2009)

圖 1-21 中和線通風豎井景美層粒徑分布



景美層是一個豐富的貯水層，在翡翠水庫完成之前，是台北市民生及工業用水的主要來源。至於景美層的水理參數，曹以松(1985)曾將台北盆地分為22個區，假設邊界補注與全年總抽水量相若，約1億4000萬噸，以水資會1982年12月之後之水位資料分析，得到各區的導水係數(T)及儲水係數(S)。但因為許多假設並不合實際，其結果並不具參考價值。

及以前所得之半。這或許與導水層之厚度有關。由圖1-22可見，在前期進行祛水作業的三個工址(CP261、CP262及CT201F標)，景美層的厚度都超過30m，而在最近進行的新莊線CK570C及CK570G兩標位於景美層沖積扇之外緣，景美層應該較薄才是，這極可能是這兩地導水係數較小的原因。但這只是推測，無法定論，因為景美層中黏土夾層，會減少透水層的有效厚度。例如在京華城下方47m至57m處有一層砂礫層(景美層)，其下是一層堅實黏土，在深度77m處又出現砂礫層。而另一方面，景美層上方的松一層及其下方的板橋層中的砂層都可能導水，增加導水層的有效厚度。此外，CK570C及CK570G兩標祛水作業大致在同一期間進行，兩者的互制行為是否影響回饋分析結果亦有待研究。本書第四章將對各標的祛水作業及景美層的水理參數作進一步說明。

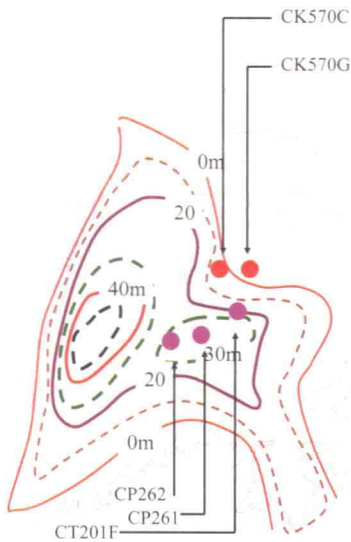


圖 1-22 捷運工程祛水作業位置圖

## 1.4 地下水

在1990年代捷運初期路網施工期間，有數個工地(包括通風豎井B：屬板橋線CP261施工標、通風豎井A：屬板橋線CP262施工標，及台北車站：屬淡水線CT201F施工標)採祛水工法降低景美層中之地下水水壓，以增加上舉及管湧的抵抗(黃南輝等，1996)。近年來，新莊線CK570G區段標大橋國小站(鄭會文等，2009)及CK570C區段標道岔段(淡水河西岸)施工期間亦採祛水工法(胡邵敏，2006)。如表1-6所示，新莊線CK570C及CK570G兩標回饋分析所得之導水係數不

地下水對地下工程影響極大。在捷運工程初期路網施工期間發生的幾個災變大都與地下水有關，而景美礫石層更是幾個大型災變的罪魁禍首。文獻記載(吳建民，1967; 1968)在日據時代，景美層的水頭呈自流狀態，也就是說高於地表。這實不為奇，因為台北盆地本來就是一個大湖，因淤積而成，四周環山，地下水層受壓以致高於地表。

在1970年代，因為台北市工商日愈發達，人口急驟增加，大量抽用地下水，以致地下水水位下降。以位於北門地區為例，景美層之測壓水位曾一度下